



**HAL**  
open science

## Cours d'hydrologie

Bernard Boudol, E. Hampp

► **To cite this version:**

Bernard Boudol, E. Hampp. Cours d'hydrologie . 3ème cycle. Hydrologie, Lyon, France. 2006, pp.456. cel-01211194

**HAL Id: cel-01211194**

**<https://hal.science/cel-01211194>**

Submitted on 10 Nov 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**BTS Gestion & Maîtrise de l'eau**



# **Cours d'hydrologie**



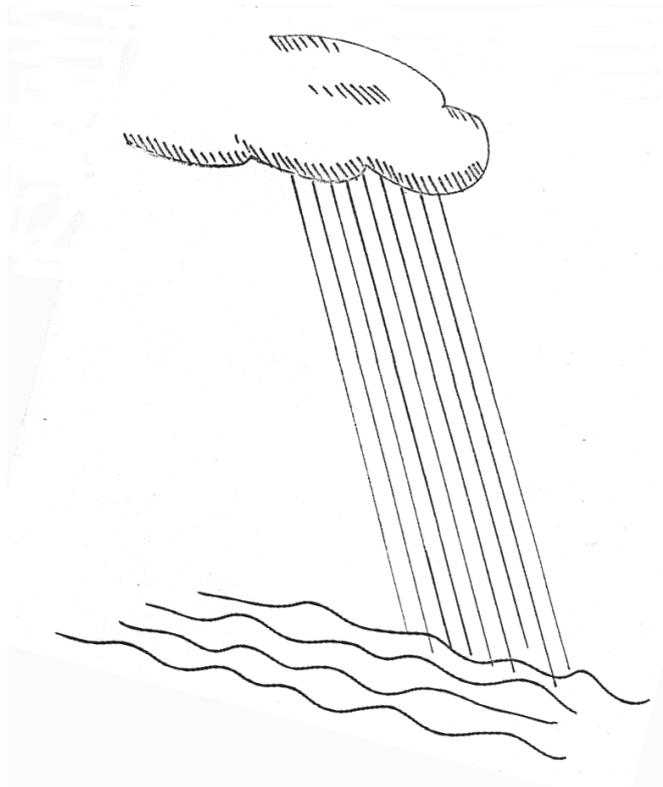
**Cours de Potamologie et d'hyétologie**  
**Cours d'Hydrogéologie et d'écosystèmes**  
**Exercices & corrigés de potamologie hyétologie**  
**Exercices & corrigés d'hydrogéologie écosystèmes**

---

**Addendum I : Cours de captage d'eau**  
**Addendum II : Lexique franco-allemand**  
**Addendum III : Compléments**

# **Cours de Potamologie et d'Hyétologie**

---



**Cycle de l'eau**

**Caractéristiques d'un bassin-versant**

**Alimentation en eau du bassin-versant**

**Circulation superficielle**

**Sol et sous-sol**

## Prologue

ένα νερό<sup>1</sup> κρύο νερό  
κι πούθεκατεβαίνει ;

“L'eau, force vive incontrôlable, sans cesse renouvelée, est toujours apparue comme un souci constant de l'homme ... ” écrivait déjà le mathématicien philosophe Thalès au VIIème siècle avant notre ère.

Depuis la plus haute Antiquité, comme en témoigne la comptine grecque placée en épigramme, elle n'a pas laissé d'inspirer des auteurs littéraires ou de susciter des bâtisseurs, aussi bien pour obvier à son excès - et l'on songe au mythe d'Hercule assainissant les marais de Lerne - que pour pallier son absence. Et l'on citera le travail des Romains qui réalisèrent le pont du Gard dans le dessein d'alimenter Nîmes en eau potable.

Aujourd'hui, cette question demeure d'actualité, à telle enseigne que la loi de 1992 reprend en préambule comme un écho une sourate du Coran : " J'ai fait de l'eau tout ce qui est vivant ".

L'hydrologie “ science traitant des eaux que l'on trouve à la surface de la terre, au – dessus et au-dessous”, selon le glossaire OMM <sup>92</sup>, se subdivise en de nombreux modules parmi eux il sera étudié l'hyétologie<sup>2</sup> “science traitant des caractéristiques des précipitations atmosphériques” la potamologie <sup>3</sup> “ science traitant du régime des cours d'eau ” et l'hydrogéologie “ science traitant de l'écoulement de l'eau dans les milieux souterrains ”.

Dans les pages suivantes correspondant à la **première partie du cours**, il sera passé en revue, à différentes échelles spatio-temporelles, les composantes et le fonctionnement de l'hydrosphère selon le plan *infra* :

### 1 Cycle de l'eau

#### 2 Hyétologie ou alimentation en eau d'un bassin-versant

- Définition d'un bassin-versant
- Caractéristiques d'un bassin-versant
- Appréhension de son alimentation

#### 3 Potamologie ou circulations superficielle de l'eau dans un bassin-versant

- Analyse de la circulation superficielle
- Caractéristiques du sol, du sous-sol et de l'humus

---

<sup>1</sup> Une eau, eau froide et d'où descend-elle ?

<sup>2</sup> du grec ο νετός , - ου : la précipitation atmosphérique : pluie, neige, grêle....

<sup>3</sup> du grec ο ποταμός -ου : le fleuve

## **Cycle de l'eau à l'échelle terrestre**



- 1. Schéma du cycle**
- 2. Bilan de l'eau en Allemagne de l'Ouest**
- 3. Facteurs météorologiques influençant le cycle**
- 4. Evapo-transpiration**
- 5. Eau dans la lithosphère**
- 6. Eaux continentales et marines , courants**
- 7. Glaciers et calotte glaciaire**

# 1 Schéma du cycle



L'eau change d'état selon les trois phases :

solide liquide gazeuse

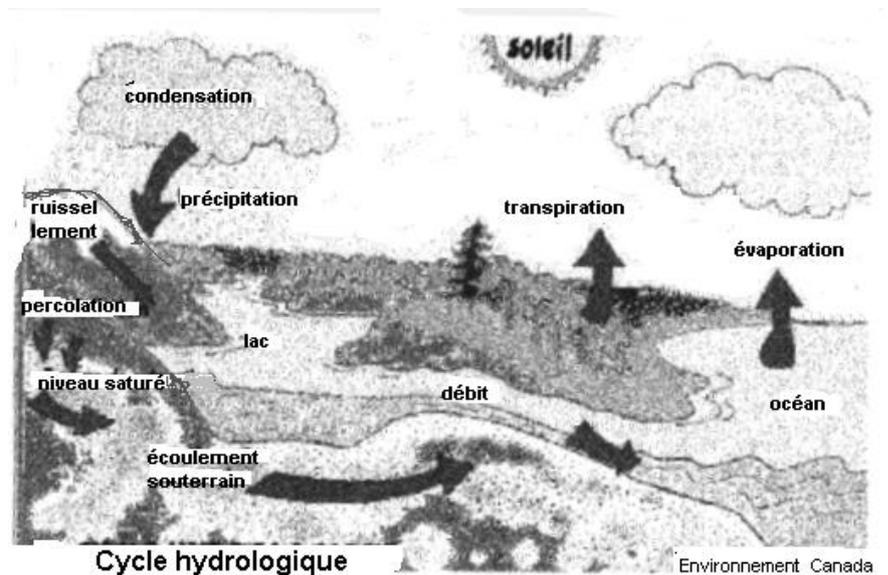
et circule entre :

l'océan, l'atmosphère, les glaciers, le sol, les rivières, les lacs et les marais.

Il a été estimé en 1991 que la quantité totale d'eau terrestre atteignait 1 360 millions km<sup>3</sup> dont moins de 3 % se trouvent dans les eaux douces ou bloquées dans la calotte glaciaire.

Paul Emile Victor disait " Si la terre occupait le volume d'une orange, l'eau douce terrestre représenterait seulement une goutte d'eau ".

Le schéma infra montre que : 8 millions de km<sup>3</sup> se situent dans l'eau du sol dont 0,2 million de km<sup>3</sup> dans l'eau des fleuves et 29 millions de km<sup>3</sup> dans les calottes polaires ou les glaciers.

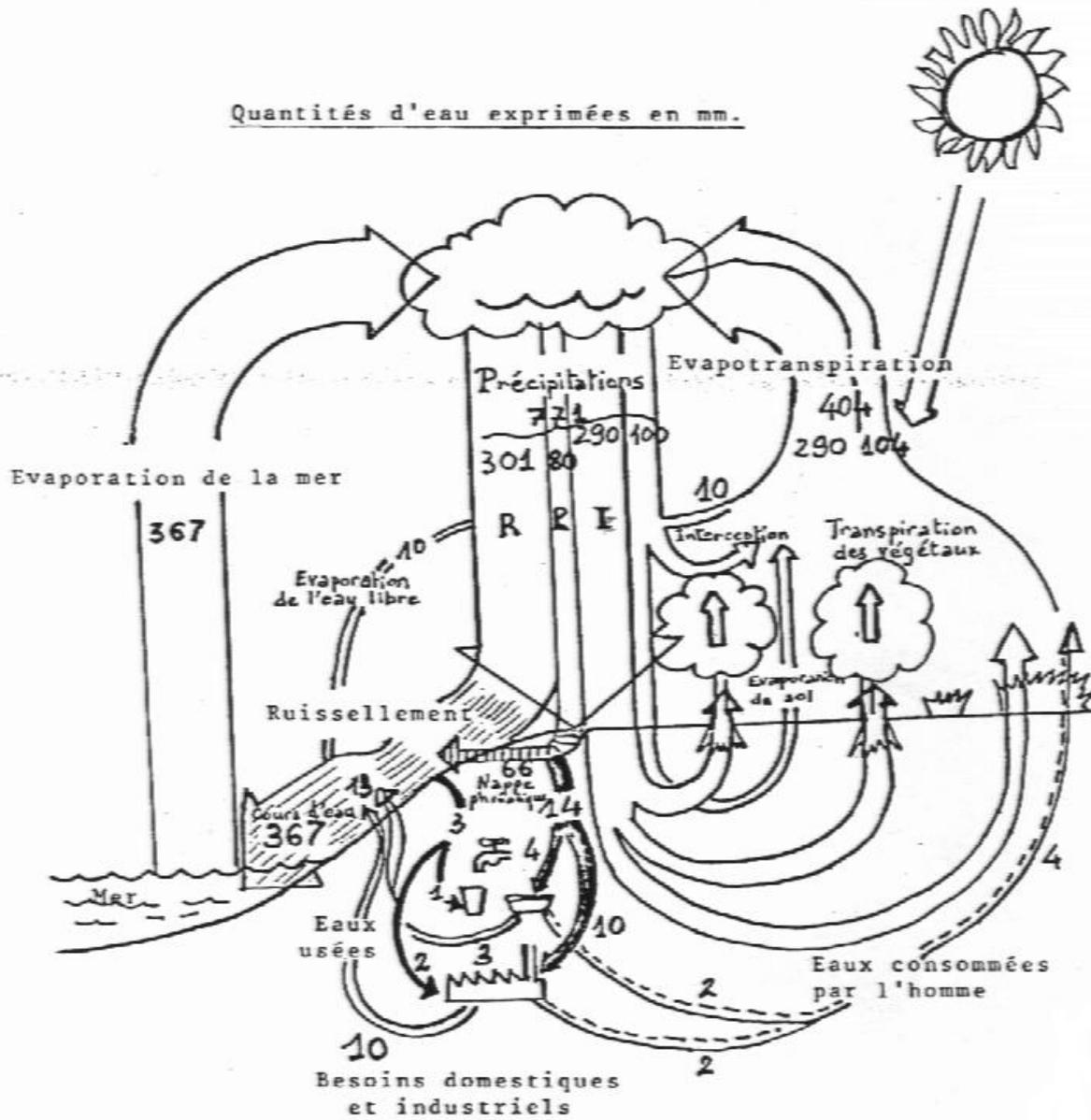


L'on remarque que l'évaporation en provenance des océans se montre plus forte que celle en provenance du sol. Par le jeu des précipitations : 40 000 km<sup>3</sup> d'eau sont annuellement transportés depuis l'océan - via l'atmosphère - jusqu'à la terre.

## Cycle de l'eau

### Valeurs pour la république fédérale allemande

selon Messieurs Clodius et Keller en 1951



- Légende**  
 R : ruissellement  
 E : évaporation  
 P : percolation

## 2 Bilan de l'eau en Allemagne de l'Ouest



Dès 1951, Messieurs Keller et Clodius du "Wasserwirtschaft Dienst der Bundesrepublik" ont réalisé une étude avec mesures sur le cycle allemand de l'eau et l'utilisation de cette dernière, à partir des 771 mm d'eau de précipitations annuelles (cf. plan ci-contre)

### 21. Provenance de l'eau :

évaporation marine		365 mm	apportés par les vents
évaporation eaux superficielles	10	}	
évaporation par le sol	130		
évapotranspiration végétale	257	}	406
évaporation des irrigations	3		
évaporation des eaux industrielles		4	
évaporation des eaux potables	2	}	

### 22. Répartition des 771 mm

ruissellement	304 mm	
percolation (infiltration)	80	dont 62 vont aux rivières
évaporation	387	

### 23. Usage

industriel :	22,9 mm
domestique	9
irrigation	4,3

### 24. Prélèvement

	{ en surface	13 mm
♦ industrie		
	{ dans le sol	9,9
on perd 4 mm par évaporation, les 18,9 mm restant vont en rivière		
	{ en surface	1 mm
♦ domestique		
	{ dans le sol	8 mm
on perd 2 mm par évaporation, 0,3 par infiltration, les 6,7 mm restant vont à l'égout puis à la rivière et à la mer		
	{ en surface	4,2 mm
♦ irrigation		
	{ dans le sol	0,1 mm
on perd 3 mm par évaporation, et 1,3 mm retourne à la rivière		

L'Allemagne d'alors qui comptait 45 millions d'âmes consommait annuellement 7 000 millions de m<sup>3</sup> d'eau :

dont 2 400 millions pour les besoins domestiques  
et 4 600 millions pour les usa

### 3 Facteurs météorologiques influençant le cycle

#### 31 L'air :

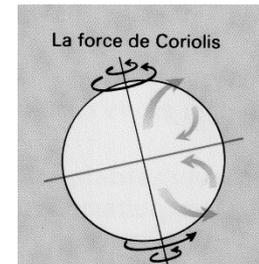
La météorologie est subordonnée aux déplacements de masses d'air à des températures différentes

L'air froid, plus lourd, crée des zones de haute pression, ou anticyclones

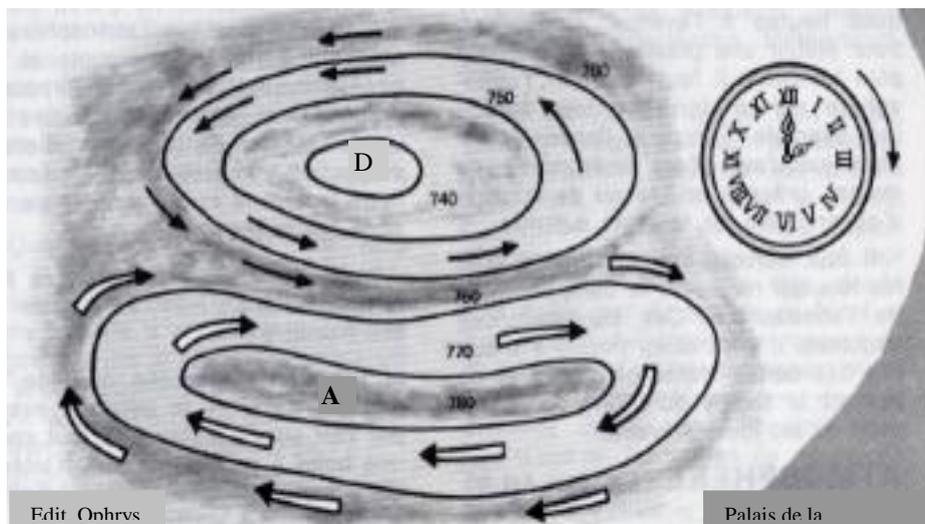
L'air chaud, plus léger, crée des zones de basses pressions ou dépressions

Les vents peuvent être définis comme des courants d'air allant d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression, mais en raison de la

force de Coriolis (rotation de la terre) ils tournent dans le sens des aiguilles d'une montre autour des anticyclones et en sens inverse, autour des dépressions - ceci pour l'hémisphère boréal.<sup>4</sup>



Les cercles de la carte infra sont obtenus en traçant les lignes isobares<sup>5</sup> reliant les points d'égale pression.



**Les fronts** : Un front représente une ligne fictive séparant deux masses d'air de température différente.

Un front se définit par un gradient de température  $d\theta / L$  (distance)

♦ front chaud : il est dit "chaud" s'il se déplace en amenant de l'air chaud  
zone d'air chaud → vent → zone d'air froid

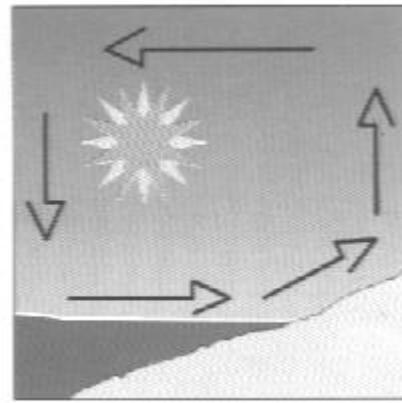
♦ front froid : il est dit "froid" s'il se déplace en amenant de l'air froid  
zone d'air froid → vent → zone d'air chaud

<sup>4</sup> Elle induit le phénomène du vortex (bonde de baignoire) tournant en sens différent selon l'hémisphère

<sup>5</sup> ἴσος, ἦο : égal et το βάρος : le poids

### La brise côtière

Le jour sous l'effet du rayonnement solaire, une brise dite de mer s'établit (soufflant de la mer vers la terre) parce que la terre réagit plus rapidement que la mer à une élévation de température, l'air revient ensuite en altitude vers la mer. La nuit le phénomène s'inverse car la terre se refroidit plus vite que la mer il se forme alors une brise de terre (soufflant de la terre vers la mer )



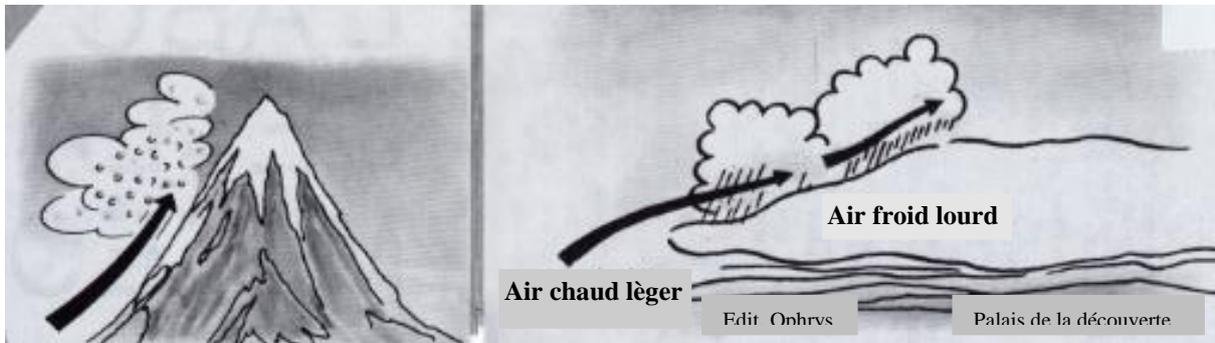
Brise de mer

Atmosphère

Dechenaux

## 32 L'eau

Les nuages peuvent se former de façons différentes



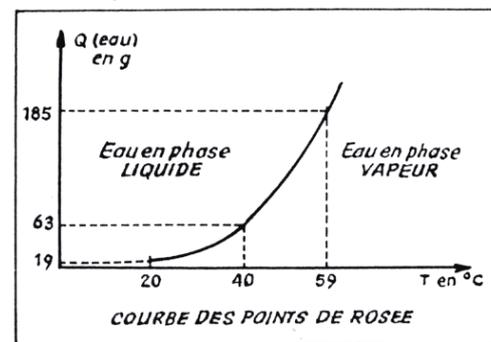
OU BIEN, l'évaporation de la vapeur d'eau provenant des terres et des océans se condense en humidité dans l'atmosphère. Poussé par le vent, l'air chargé de vapeur d'eau ne peut s'élever s'il rencontre un obstacle : montagne ou masse d'air froid. L'air se refroidit en s'élevant et la vapeur d'eau se condense en fines particules pour former des nuages ( cf. figure supra)

OU BIEN, des nuages sont formés vers 10 000 mètres d'altitude et sont composés de minuscules cristaux de glace puisque la température reste inférieure à 0° et l'on se trouve avec la phase solide de l'eau, c'est-à-dire la glace.

En effet plus la température est basse et moins le même volume d'air peut contenir de vapeur

Cf. graphique ci-contre

Cela constitue l'une des plus importantes causes de pluie.



**Les précipitations** : Au sein du nuage, sous certaines conditions, notamment de température

les gouttelettes s'agglomèrent et forment de grosses gouttes tombant en pluie, ou de neige.

## 4 Evapo-transpiration

Sous l'influence de l'énergie solaire, l'eau du sol s'évapore, soit directement dans l'atmosphère, soit par le truchement des végétaux, lesquels absorbent l'eau tellurique puis la restituent sous forme de transpiration.

### 41 Notion d'angle solide

Le soleil rayonne selon un angle solide de l'énergie laquelle frappe la surface du sol

$dS$  = élément de surface

$MS = D$  distance terre - soleil

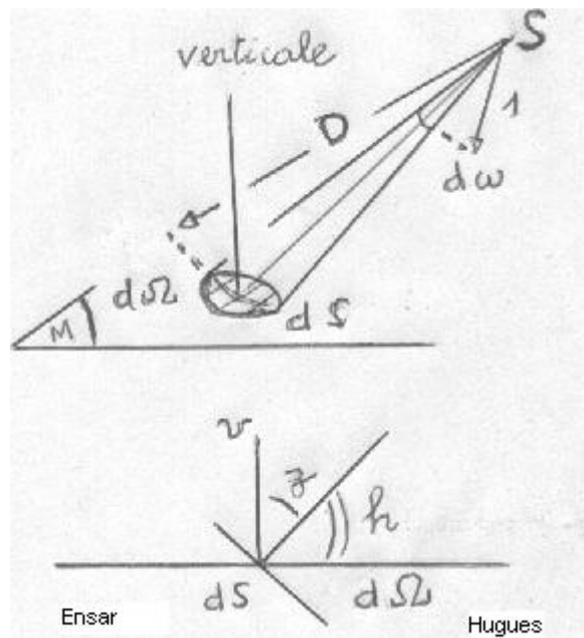
soit deux sphères de centre  $S$  ( $r=1$  et  $r = D$ )

$$\frac{d\omega}{d\Omega} = \frac{1}{D^2}$$

$$d\omega = \frac{d\Omega}{D^2}$$

$$\begin{aligned} \text{mais } d\Omega &= dS \cos z \quad (z : \text{distance zénithale}) \\ &= dS \sin h \quad (h : \text{hauteur du soleil}) \end{aligned}$$

$$\text{donc } d\omega = \frac{dS \sin h}{D^2} \quad (1)$$



### 42 Rayonnement

Le soleil rayonne donc de l'énergie répartie uniformément dans toutes les directions. Soit  $I$  l'énergie rayonnée par unité de temps dans l'unité d'angle solide fraction d'énergie émise dans un angle  $d\omega$  :

$$d e = I d\omega$$

$$\text{mais (1) } d\omega = \frac{dS}{D^2} \sin h$$

$$\text{donc } d e = \frac{I}{D^2} dS \sin h$$

Cette énergie frappe la surface  $dS$ , donc l'unité d'aire reçoit

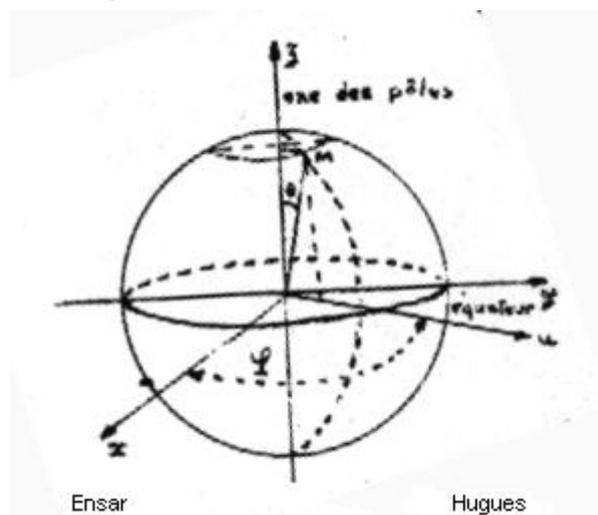
$$q = \frac{d e}{dS} = \frac{I}{D^2} \sin h \quad \text{pendant l'unité de temps}$$

$$\text{Posons } C = \frac{I}{D^2} \quad \text{énergie reçue/unité surface/pendant l'unité de temps}$$

L'unité de temps sur un élément d'aire unité, perpendiculaire au soleil

$C$  sera la constante solaire pour une distance moyenne  $D^0$

$$\text{Il vient } q = C \frac{D^0}{D^2} \sin h$$



$$q = C \sin h$$

q : représentant l'énergie reçue/unité de temps/unité de surface du sol horizontal, à l'instant de la journée où le soleil est à h sur l'horizon.

En sommant les énergies unitaires, on obtiendra l'énergie totale reçue.

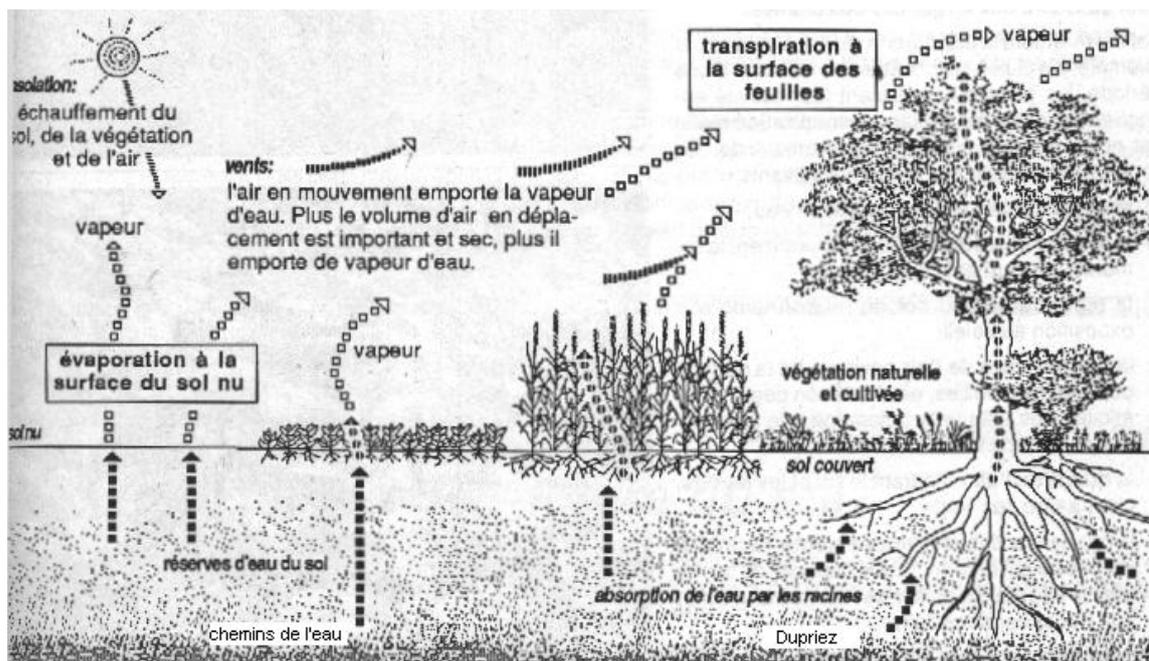
Il faut noter également que la **latitude** joue donc un rôle important dans l'appréciation de l'énergie reçue, elle est égale à  $\frac{\pi}{2} - \varphi$  cf. schéma supra.

2

• **L'héliographe** de Campbell permet de mesurer le rayonnement, mais environ 20 % de l'énergie théorique sont absorbés par l'air, et les nuages occultant le soleil absorbent également de l'énergie.

### 43. Evapo-transpiration

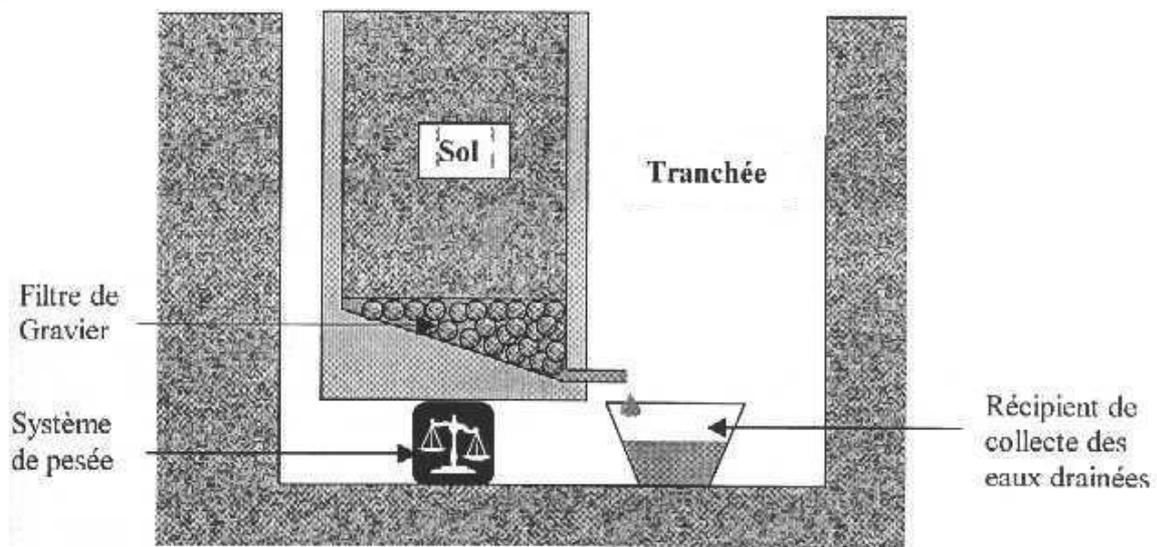
Le diagramme infra représente l'évaporation sur un sol nu et l'évaporation via les feuilles des plantes, cette dernière varie dans le temps, de la levée à la pleine maturité des tiges feuillées la capacité de transpirer d'un champ de sorgho va augmenter en proportion du développement racinaire et foliaire.



### 44. Mesure

L'évapo-transpiration se mesure par des cases lysimétriques<sup>6</sup> où l'on plante une culture, on recueille en bas l'eau qui a percolé.

<sup>6</sup>λύω : dissoudre το μέτρο : la mesure



Une case lysimétrique

Fonctionnalités alternatives des réseaux d'irrigation gravitaire

Ensam

Cf. schéma infra

Pour une case donnée, on déterminera un ratio d'infiltration ou percolation :

$\frac{\text{Eau infiltrée}}{\text{Eau apportée}}$  en établissant le tableau infra.

	Quantité eau du sol	pluie du mois	eau percolée
1 <sup>er</sup> mai	Q 1	Q M	Q P
31 mai	Q 2		

$$\text{évapotranspiration} = Q 1 + Q M - (Q 2 + Q p)$$

#### •Evapotranspiration potentielle

Si l'on pose que l'évapo-transpiration reste indépendante de la nature du sol, de la nature du végétal,

SI la végétation couvre bien le sol  
SI le sol possède une hygrométrie<sup>7</sup> suffisante.

Cela correspond à l'évaporation d'une surface d'eau libre d'égale surface.

Dans ce cas, on l'appelle **évapo-transpiration potentielle** laquelle est fournie par la formule de Turc

$$E T p = \frac{0,40 t}{t + 15} (I g + 50)$$

E T p : mm eau/mois    t = température moyenne mensuelle

<sup>7</sup>το ύγρο : le liquide    το μέτρο : la mesure

$I_g$  : radiation moyenne journalière en  $\text{calg}/\text{cm}^2/\text{jour}$  sur le mois

Exemple : A Rennes en mars  $I_g = 239 \text{ calg}/\text{cm}^2/\text{jour}$   $t = 8^\circ\text{C}$

ETP = 41,2 mm

## 5 Eau dans la lithosphère<sup>8</sup>

### 51 Eaux superficielles

En arrivant au contact du sol, les eaux de pluies, selon la perméabilité du terrain, s'infiltrent ou ruissellent en formant des rivières pouvant recevoir des eaux précédemment infiltrées. Elles recueillent l'eau provenant de leur "**bassin versant**".

Une rivière constitue un système comportant un cours principal et des tributaires qui l'alimentent. La principale caractéristique de la rivière se situe dans **la continuité d'un flot régi par les lois de la gravitation**, au sein d'une aire géographique : le bassin-versant.



Des changements physiques, telles que la pente, la géologie du substratum peuvent entraîner des modifications le long des cours ; ainsi un torrent montagnard se mue en un large fleuve tranquille en plaine comme cette rivière-estuaire irlandaise de la figure *supra*.

### 52 Eaux souterraines

Sans remonter à une antiquité trop éloignée, constatons que dès 1580, Palissy dans son "Discours admirable de la nature des eaux et des fontaines" reconnaissait que les sources trouvent leur origine dans les eaux d'infiltration des pluies qui pénètrent dans l'intérieur de la terre jusqu'à ce

---

<sup>8</sup> ο λίθος : la pierre    η σφαίρα : la sphère

qu'elles rencontrent un fond de roche compact ou argileux. Il reconnaissait l'origine météorique des eaux superficielles ou souterraines.

Les terrains, selon leur nature physique et chimique, suivant les cassures et les pentes qui les traversent, sont capables de retenir ou de laisser filtrer plus ou moins d'eau.

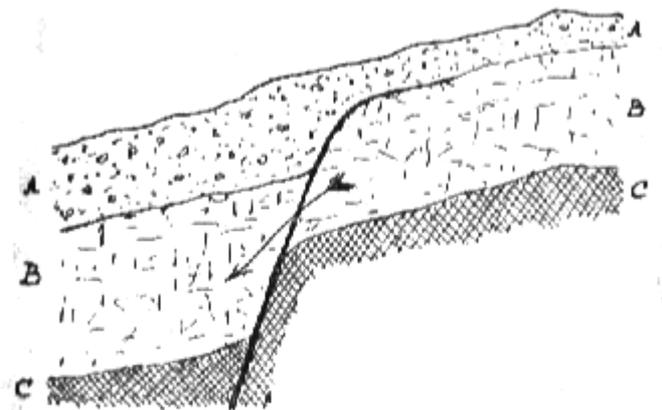
• **Classement :**

En fonction de cette aptitude, ils se classent en imperméables ou perméables suivant leur **porosité**

(porosité =  $\frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}}$  ) par exemple l'argile est considéré comme imperméable et le sable, comme perméable.

volume total

La figure ci-contre indique l'itinéraire de l'eau dans un terrain bouleversé par des failles où alternent les couches perméables et imperméables - la couche C reçoit les eaux des couches A et B.



**Circulation de l'eau dans des terrains avec des failles**

A : couche sableuse perméable  
 B : calcaire fendillé perméable C : argile imperméable

Art de capter les sources

Auscher

En ce qui concerne la porosité, le tableau infra indique la quantité d'eau qu'UN m<sup>3</sup> de roches fragmentées retient dans ses vides.

Nature	Quantité d'eau en litres par m <sup>3</sup> de roche
sable fin	300
gravier (25 mm)	400
pierre (100 à 200 mm)	500

Il résulte que des vides se trouvent d'autant plus grands que les éléments sont plus gros. La porosité de la pierre apparaît comme supérieure à celle du sable.

Il faut préciser que le milieu poreux idéal possède des vides interconnectés, les pores sont reliés entre eux par exemple, le sable non consolidé, MAIS la pierre ponce reste imperméable, car ses vides ne sont pas connectés.

• **Nappe phréatique<sup>9</sup>:**

<sup>9</sup> το φρεάρι, φρεάτιος : le puits

L'hydrologue Daubrée a donné le nom de "phréatique" à la première nappe rencontrée depuis la surface, elle présente une importance particulière, car elle fournit l'essentiel des ressources en eau potable. Elle est appelée en Italie "acqua di livello" et en Allemagne "Grundwasserspiegel"

## 6 Eaux continentales et marines - Courants

### 61 Lacs

Beaucoup de lacs naturels européens apparurent voici 10 à 15 000 ans. Ils furent remodelés lors de la dernière période glaciaire "le Weichsel". La couverture glaciaire recouvrit tout le nord de l'Europe, mais dans le centre et le sud, elle se limita à la zone montagneuse. La Finlande et la Suède comptant 5 à 10% de leurs territoires en lacs.

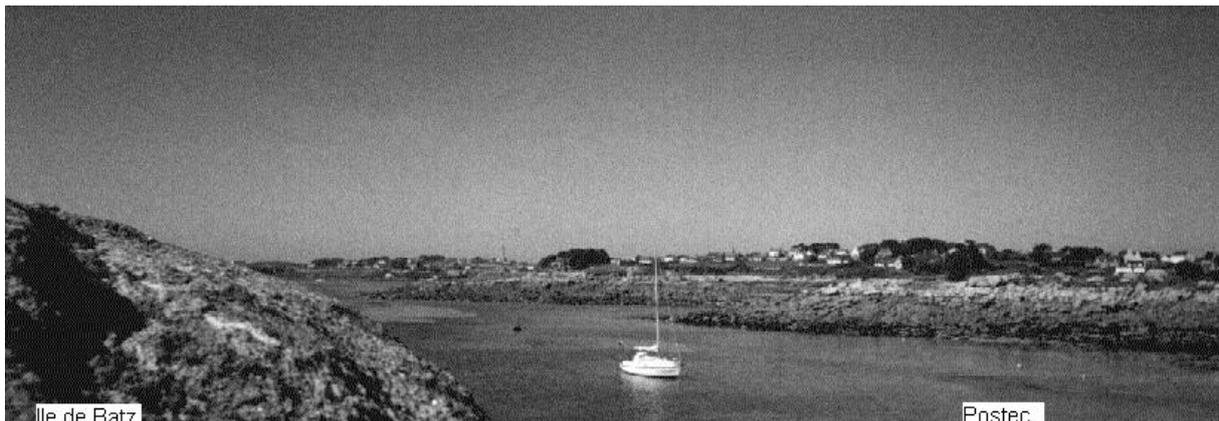
En Europe centrale, les lacs naturels se situent donc dans les régions montagneuses : lac Léman, Boden See, Lago Maggiore, Lago di Garda, Lago di Como. Il faut noter l'exception des lacs hongrois, Balaton et Neusiedler See qui se situent en plaine.

Ces lacs disposent d'une alimentation en eau : rivière, ruissellement d'un bassin versant, pluie et d'un exutoire : ruisseau, fleuve.

### 62 Mers

Homme libre , toujours tu chériras la mer  
La mer est ton miroir ; tu contemples ton âme  
Dans le déroulement infini de sa lame,  
Et ton esprit n'est pas un gouffre moins amer

Les mers, que décrit si bien Baudelaire dans le poème supra, jouent un rôle clef pour maintenir l'équilibre naturel de la biosphère<sup>10</sup> terrestre. Couvrant les deux tiers de la surface du globe, les mers contiennent 97% de l'eau mondiale. Les interactions entre les mers et l'atmosphère influent fortement sur les climats.



**62. 1 Exemple** : l'augmentation de la température de surface de l'océan Indien, entre l'hiver et l'été, reste moindre que celle de la surface du continent indien (à cause du brassage des vagues qui chasse la chaleur en profondeur). Il s'en suivra le vent, apportant **la mousson**, qui, de juin à

---

<sup>10</sup>ο βίος : la vie    η σφαίρα : la sphère

octobre, soufflera de la mer d'Arabie plus froide, vers la péninsule indienne, apportant la pluie souvent en quantité considérable (12 mètres /an) à Cherra Punji (au pied de l'Himalaya).

En outre, de par leur vie végétale (plancton, algues) les mers peuvent être considérées comme le "poumon" de la planète, car la photosynthèse marine joue un rôle capital pour l'élimination du CO<sup>2</sup> de l'atmosphère.

## 63 Courants

### 63.1 Courants continentaux

Ils occupent une place importante de par leur influence climatique.

#### 631.1 Courant du Gulf stream :

Le fameux "Gulf Stream" qui remonte des Antilles en direction de la Norvège adoucit le climat de la Bretagne cf. île de Batz ci-contre

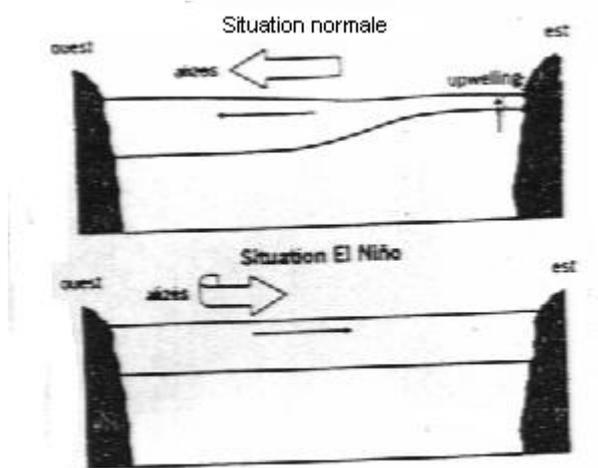
..... et des îles britanniques ( 10 ° en plus) il charrie des eaux chaudes en surface alors que l'eau froide lourde de la salinité abandonnée par les glaciers norvégiens revient vers l'Amérique en profondeur.

#### 631.2 Courant de Humboldt

L'eau, plus salée, donc plus dense, peut remonter en surface par suite de l'inclinaison de la surface de l'eau sous l'effet d'un vent dominant. Cette eau, plus froide, demandera plus d'énergie pour s'évaporer, d'où prise de chaleur à l'atmosphère sous forme de chaleur latente

.Ainsi le long des côtes du Pérou, le courant de Humboldt, sud-équatorial, remonte vers l'équateur selon ce principe

Mais si la baisse des alizés se produit, les eaux froides ne remontent plus et l'eau chaude arrive sur la côte du Pérou : phénomène "El Nino" en 1983 et 1998.



Météo-France

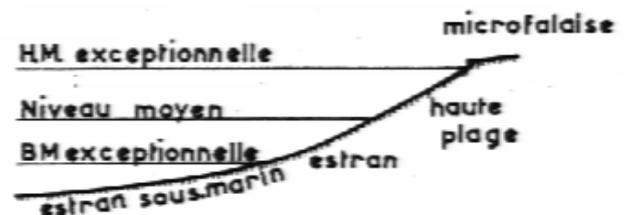
Cf. croquis ci- contre

### 63.2 Courants locaux

Ils jouent un rôle capital dans le transport de matériaux que ce dernier soit perpendiculaire ou parallèle au rivage

#### 632. 1 Profil d'équilibre d'un rivage

La mer passe son temps à remuer et à reclasser les matériaux du fond sans arrêt. Il s'en ensuit une érosion qui reste fonction ( du maximum de la vitesse alternative de l'eau au voisinage du grain de sable), ladite vitesse étant liée à la période<sup>11</sup> d'oscillation T de la houle)



PROFIL SCHEMATIQUE D'UNE PLAGE ET D'UN FOND SOUS-MARIN SANS BARRES

<sup>11</sup> période T : écart de temps moyen entre le passage de deux crêtes successives au même point

Il existe un profil d'équilibre si la houle conservait indéfiniment la même orientation et les mêmes caractéristiques

Cf. croquis ci-joint

Le profil d'équilibre de la partie concave, constamment immergée diffère peu d'une parabole

$$Y = K (X)^m$$

$$L_o \quad L_o$$

Avec Y : profondeur de chaque point du profil sous le niveau du repos,

X : distance horizontale de chaque point du profil à la trace du niveau de repos le long du rivage,  $L_o$  : longueur d'onde de la houle au large (distance moyenne entre deux crêtes)

### 632. 2 Transport de sable perpendiculaire au rivage

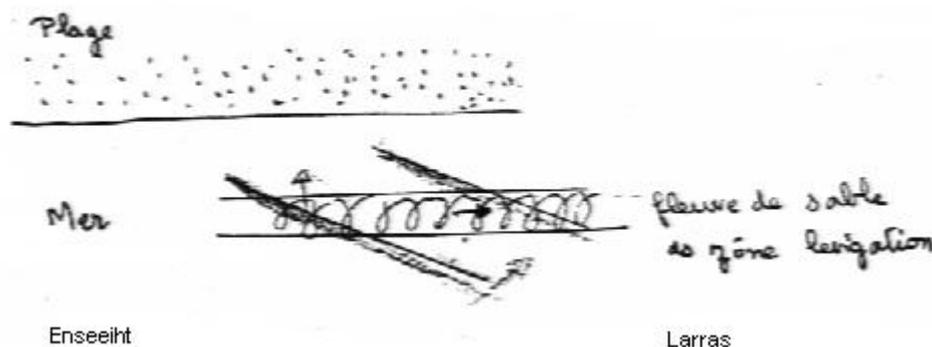
La houle "porte à la côte", elle ensache, donc elle apporte du sable.

Le courant de retour (undertow) "porte au large" donc il emporte du sable.

### 632. 3 Transport de sable parallèlement au rivage

Le déferlement des lames de la houle obliquement au rivage entraîne des transports d'eau portant le nom "courant de transport par rouleaux". Le sable mis en suspension progresse parallèlement au rivage dans le sens de la houle, au niveau de la première ligne de rouleau surtout

cf. schéma *infra*



Ce type de transport tient la première place

### 632. 4 Echelonnement des matériaux

Les éléments les plus fins (sables) se trouvent en direction du large

Les éléments les plus gros (galets) se situent en direction du rivage

### 632. 5 Conséquences théoriques

La pente de la plage est d'autant plus douce que la houle est plus creuse et que le sable est plus fin,

La pente de la plage est d'autant plus raide que la houle est moins creuse et que le sable est plus gros,

Les plages s'engraissent dans leur partie haute au détriment des parties basses dans les périodes de faible agitation,

Les plages s'amaigrissent dans leur partie haute au profit des parties basses dans les périodes de forte agitation,

L'on peut dire que les plages **basculent** de part et d'autre du milieu de l'**estran**<sup>12</sup> sans qu'il y ait jamais conservation exacte des volumes.

### 632. 6 Exemple de la baie de La Baule

Sous l'action conjuguée de la houle et des courants, le sable est repoussé vers les parties latérales de la baie alors que la partie centrale devient victime de l'érosion.

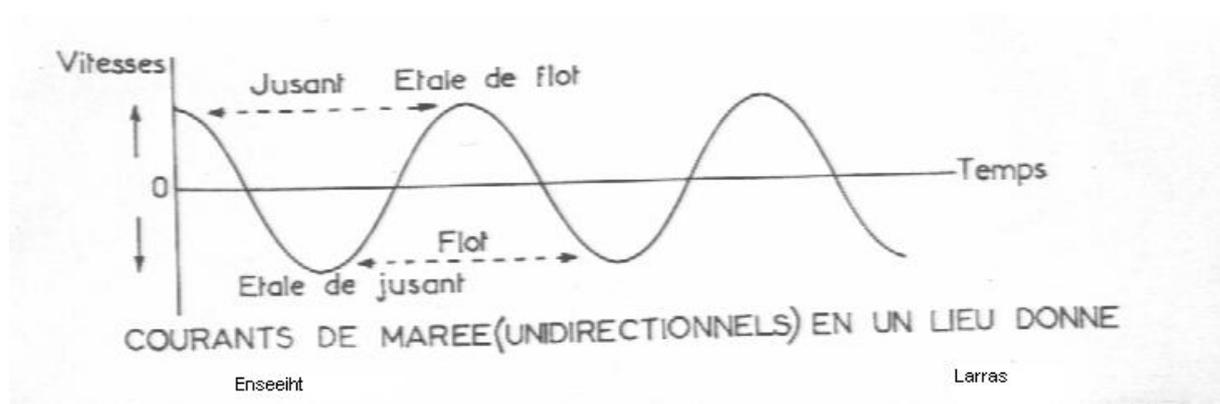
En 10 ans l'estran de la Baule a perdu 100 000 m<sup>3</sup> de sables qui se retrouvent sur l'estran du Pornichet ! avec lequel il constitue une unité physiographique au sein de laquelle intervient la **compensation volumétrique**

La cité touristique de la Baule doit donc régulièrement apporter du sable sur sa plage pour lutter contre le désensablement.

## 63. 3 Courants de marée

### 633. 1 Définitions

- Le courant de flot correspond à la partie de la marée pendant laquelle le niveau de la mer va constamment en montant,
- Le courant de jusant correspond à la partie de la marée pendant laquelle le niveau de la mer va constamment en baissant,



Voir graphique *infra*

La vitesse de ces courants peut atteindre ... 8 nœuds ( 1 nœud = 0,5515 m/s)

### 633. 2 Transport par la marée

Le courant de jusant et le courant de flot entraînent dans un incessant va-et-vient les sables



<sup>12</sup> estran : partie ligne de rivage d

éduit évidemment à la

Jusant en Noordzee

L. Cormier

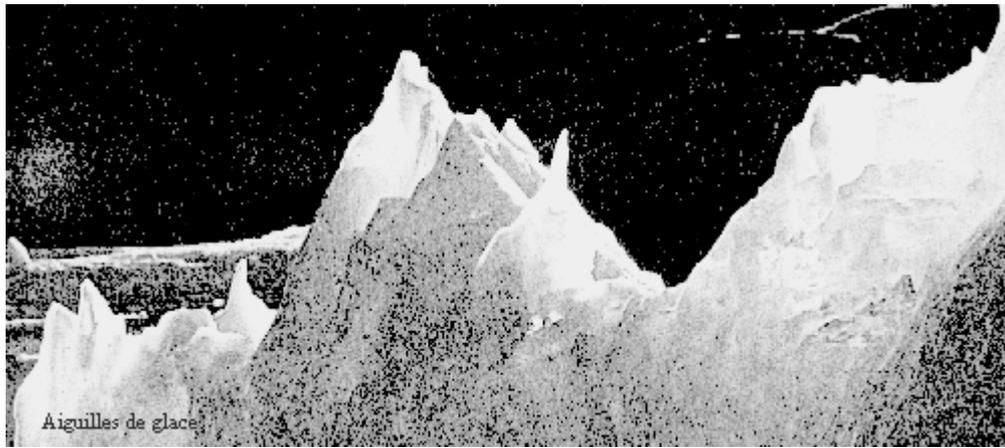
qu'ils arrachent eux-mêmes au fond et les sables mis par ailleurs en suspension par la houle.

Ces sables tendent à se déposer à chaque étale<sup>13</sup> du courant dans les zones de faible turbulence et de faible vitesse.

## 7 Glaciers et calotte glaciaire

### 71 Genèse

A l'origine, la terre semble avoir été exempte de glaces, mais depuis quatre millions d'années, elle subit des glaciations cycliques, la dernière le "Weichsel" débuta voici deux millions d'années, et dure encore.



Pendant des périodes de 20 000 à 100 000 ans, sept périodes glaciaires se succédèrent pendant lesquelles des glaciers s'édifièrent sur les continents de l'hémisphère boréal et se retirèrent brusquement.

De tels changements purent être reconstitués grâce à la paléopalynologie<sup>14</sup>, qui permet de dater, grâce aux pollens conservés dans les glaces, les phénomènes ainsi que la mesure de l'isotope lourd de l'oxygène 18 qui, en période froide, s'accumule dans les sédiments marins, alors que l'isotope léger de l'oxygène 16 se trouve<sup>15</sup> dans la neige tombant sur les continents.

### 72 Période contemporaine

Aujourd'hui, environ 2% de l'eau de la planète est fixée sous forme de glace, principalement sur la calotte glaciaire du Groenland et sur le continent antarctique, la calotte du pôle austral représente la surface des Etats-Unis et du Mexique.

Les archives d'Arles indiquent que lors du petit âge glaciaire ( du 16ème au 19ème siècle) les glaces flottantes descendaient le Rhône, en 1709 par exemple et des crues de + 4 mètres survenaient.

### 73 Théorie de Milankovitch

---

<sup>13</sup> étale : période pendant laquelle le niveau reste momentanément stationnaire entre la montée et la baisse.

<sup>14</sup> παλαιός, ἄ, ὁ : ancien ο παλυνος : poudre ( pollen) ο λόγος : le discours

<sup>15</sup> εκλείπω : disparaître ( circonférence suivie par le soleil sur la sphère céleste où se produisent les éclipses)

Ce dernier avança que ces glaciations se trouvaient directement liées aux quantités d'énergie solaire reçues par la surface du globe, lesquelles sont associées aux variations de l'orbite terrestre autour du soleil selon trois paramètres :

- obliquité de l'écliptique<sup>2</sup> (angle axe de la terre et plan de l'écliptique)
- direction dans laquelle pointe l'axe de la terre
- excentricité de l'orbite terrestre

## **Alimentation en eau d'un bassin-versant**

---

### **1. Définition d'un bassin-versant**

### **2. Caractéristiques d'un bassin-versant**

- 21. Ligne de partage des eaux . Exutoire. Loi de 1964**
- 22. Dimensions**
- 23. Topographie. Pentes**
- 24. Réseau hydrographique. Tributaires**
- 25. Lithologie**
- 26. La couverture végétale**

### **3. Appréhension de l'alimentation**

#### **31. Mesures pluviométriques**

- 31.1 Pluviomètre**
- 31.2 Pluviogramme**
- 31.3 Radar**

#### **32. Autres mesures météorologiques**

- 32.1 Hygromètre**
- 32.2 Anémomètre**
- 32.3 Héliographe**

#### **33. Connaissance des pluies par des mesures pluviométriques**

- 33.1 Courbes isohyètes**
- 33.2 Modules**
- 33.3 Pluviogramme**
- 33.4 Hyétogramme**
- 33.5 Courbe intensité-durée-période de retour**
- 33.6 Répartition spatio-temporelle**

#### **34. Connaissance des autres caractéristiques climatiques**

- 34.1 Vents**
- 34.2 Températures**
- 34.3 Ensoleillement**

#### **35. Regroupement des critères météorologiques**

---

- 35.1 Relevés bruts
- 35.2 Climatogramme

## 36. Neige glace fonte des neiges

- 36.1 Processus
- 36.2 Impact nival sur le débit des rivières alpines
- 36.3 Impact nival sur les glaces fluviales au Canada

# 1 Définition d'un bassin-versant

Un jour la division du globe en bassins remplacera  
Cette foule de démarcations territoriales .....

D'Allent ( conventionnel l 793)

A la fin du 18ème siècle fut introduit la notion de bassin au point qu'un révolutionnaire estima , voir texte en épigraphe, qu'elle servirait de frontière ! Le bassin peut se définir, géographiquement, comme la surface terrestre sur laquelle les eaux de pluies tombées, alimentent le talweg<sup>16</sup> drainant ladite surface par le truchement éventuel de sous-bassins versants.

Ainsi, dans la photographie *infra*, le bassin-versant dit du Glenmacnass en Irlande l'on voit le talweg où serpente le cours d'eau.



Vallon de Glenmacnass

Irlande

**N.B.** Il peut ne pas exister de concordance entre le bassin-versant **géographique** et le bassin-versant **hydrogéologique**, si, par le phénomène karstique<sup>17</sup>, une rivière souterraine

<sup>16</sup> das Tal : la vallée der Weg : le chemin

<sup>17</sup> Karst : montagne calcaire slovène

venue de loin, alimente la nappe phréatique, et partant, la rivière du bassin-versant géographique par la communication nappe/rivière.

Exemple : La rivière la Sorgue, reçoit par la fontaine de Vaucluse, des eaux alpines.

Enfin, signalons que les Italiens désignent le bassin-versant par l'expression "*bacino imbrifero*" c'est-à-dire, bassin porte pluie, et les Allemands par "*Einzugsgebiet*", c'est-à-dire zone d'entrée.

## 2 Caractéristiques d'un bassin-versant

### 21 Ligne de partage des eaux. Exutoire

Pour déterminer la surface géographique d'un bassin-versant, il importe, au moyen de la cartographie et des altitudes, de fixer "la ligne de partage des eaux" séparant un bassin-versant de son voisin.

Par exemple, la ligne de partage des eaux entre la Loire et le Rhône passe dans un faubourg de Saint-Etienne, jouxtant la commune de Terrenoire.

Si cette recherche s'avère aisée dans les régions à relief accentué, elle devient plus délicate lorsque la région offre un aspect plat.

Chaque bassin-versant possède un exutoire dans le talweg principal, drainant les précipitations tombées sur ledit bassin.

La loi de 1964 en France, qui fut copiée dans de nombreux pays, instaura :

- que de l'amont à l'aval il existait une solidarité *de facto* entre les usagers,
- que l'eau n'étant pas un *res nullius*, elle génèrait un coût devant être partagé entre les usagers, par le fonds national de l'eau et d'autres redevances ....
- que pour la gestion il était créé des Agences de l'eau dépendantes des Comités de Bassin où siègent les édiles, les usagers, les associations ....

La France a été subdivisée en Agences de l'eau, définies par les grands bassins-versants du pays, et le cours d'eau ou la mer exutoire :

Agence Rhône-Méditerranée-Corse (exutoires : Rhône et mer)

Agence Adour-Garonne (exutoires : Adour, Garonne)

Agence Rhin-Meuse (exutoires : Meuse - Rhin)

Agence Loire-Bretagne (exutoires : Loire et océan)

Agence Seine-Normandie (exutoires : Seine et océan)

Agence Artois-Picardie (exutoire : Manche)

### 22 Dimensions

Elles peuvent varier énormément. Ainsi, le Nil, qui sort du lac Victoria pour se jeter en Méditerranée, baigne de ses eaux plus de 6 600 kilomètres de terre africaine, alors que le Jabron (cours d'eau drômois se jetant à Montélimar dans le Rhône) ne parcourt que 37 kilomètres pour rejoindre le fleuve.

### 23 Topographie<sup>18</sup> - pente

---

<sup>18</sup> οτόπος : le lieu γράφω : écrire

Il convient d'examiner successivement les versants et le profil longitudinal du talweg. La déclivité des premiers, conditionne en effet, le temps de réponse de la rivière, tandis que le profil longitudinal détermine plus précisément l'évolution du flot de crue.

Par examen des photographies aériennes et des observations sur le terrain à partir de la carte au 1/20 000<sup>ème</sup>, l'on détermine :

- les catégories de pente significative des versants
- la répartition géographique (amont-aval) des versants.

La photographie *infra* montre les pentes de la rivière Tessin



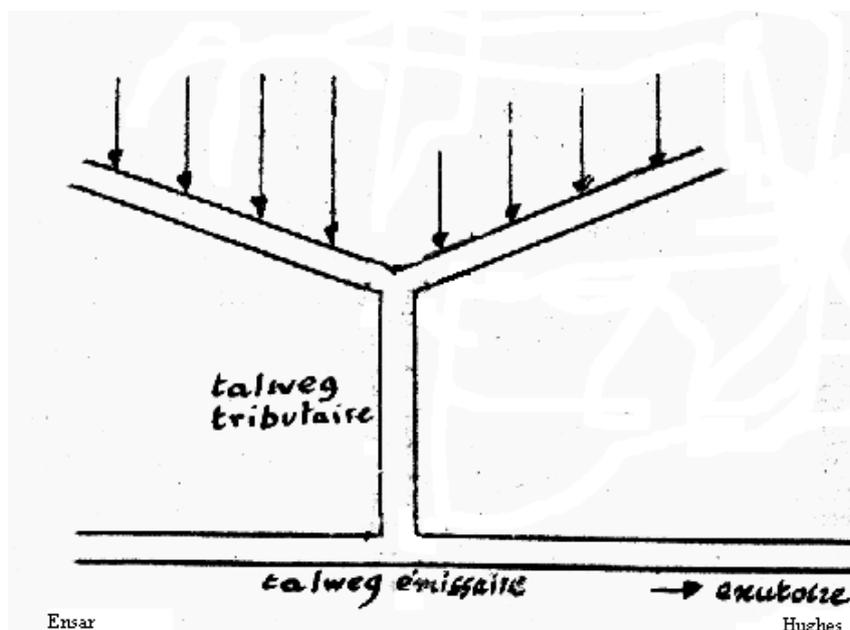
Le Tessin, rivière italienne

Europe's environment

Enfin, il convient de tracer le profil longitudinal du talweg, ainsi que celui de ses principaux affluents. Ceci s'effectue à partir de la carte au 1/20 000ème

## 24 Réseau hydrographique -Tributaires - Ordre de drainage

Au sein d'un bassin-versant, il n'existe pas qu'un seul talweg émissaire, mais de multiples talwegs tributaires. cf. schéma *infra*, apportant leur tribut au talweg émissaire.



On donne par ordre croissant un n ° d'ordre aux tronçons de l'arborescence du cours d'eau., le point le plus à l'amont étant d'ordre I puis 2 puis 3 puis ..... i , au –delà de 6 on se trouve vers l'aval

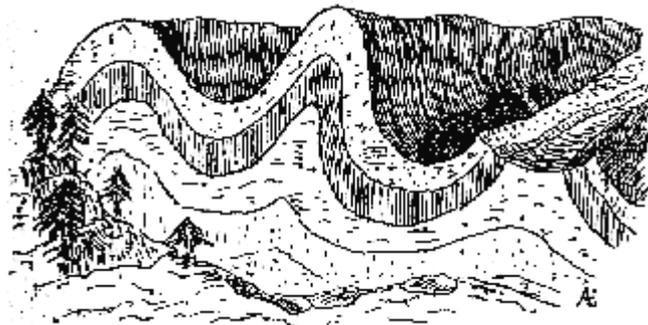
Il faudra donc étudier chaque talweg tributaire en relevant la longueur, les pentes, en tenant compte de leur répartition et de leur signification.

## 25 Lithologie<sup>19</sup>

Les écoulements dans le sol sont régis par des équations hydrodynamiques, mais celles-ci restent dépendantes du sol lui-même. En effet, il s'avère primordial de connaître convenablement la composition du sol : TEXTURE et son arrangement : STRUCTURE.

### 25.1 Rappel géologique et texture :

L'on distingue les "terrains éruptifs" composés de gneiss, de granit (bases de l'écorce terrestre) et les " terrains sédimentaires " dus aux sédiments déposés par les mers, tels que : argile, calcaire, charbon. Parfois sous des poussées volcaniques , ces sédiments deviennent des schistes (ardoise) ; on appelle ces dernières, des " roches métamorphiques"<sup>20</sup>. Il faut savoir que les couches sédimentaires ne se présentent pas forcément parallèles et horizontales, mais souvent mouvementées cf. la figure ci-contre



Art de capter les sources

Auscher

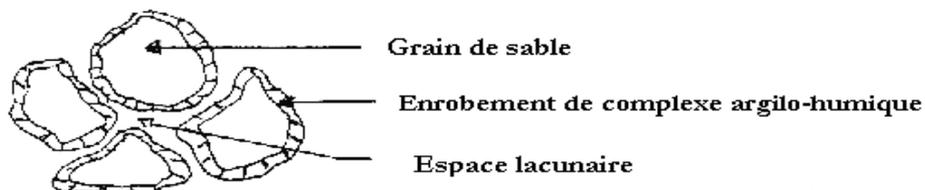
Après avoir défini la texture, donc la composition des sols sédimentaires ou cristallins, etc... il faut se préoccuper de la structure.

### 25.2 Complexe argilo-humique et structure : Cette dernière dépend :

- de la distribution granulométrique des éléments solides composant le sol : sable (1 µm) argile (26 µm)

- de l'existence de forces capillaires<sup>21</sup> dues aux charges en argile et en humus.

Un sol de bonne structure se présente avec les éléments figurant sur le schéma infra, le noyau correspondant à un grain de sable entouré d'un enduit, sorte de pâte baptisée "complexe argilo-humique" (contenant argile + humus). Entre eux, existent des vides remplis d'air et d'eau. La présence de Ca<sup>++</sup> reste indispensable pour l'obtention dudit complexe.



<sup>19</sup> ολίθος : la pierre ολόγος : le discours

<sup>20</sup> μετά : de nouveau - ημορφή : la forme

<sup>21</sup> cappilus : le cheveu (latin)

La structure peut s'expliquer par la comparaison suivante : Dans un cageot de cerises, l'on trouve des noyaux (grains de sable) des pulpes (complexe argilo-humique) des vides (espace lacunaire). Si l'on écrase le cageot, la pulpe s'écoulera et il ne restera que les noyaux.

On pourra, une fois ces données recueillies, connaître les zones à infiltration profonde, celles à infiltration rapide, donc à faible capacité de rétention<sup>22</sup> et celles à infiltration lente, donc à forte capacité de rétention.

## 26. La couverture végétale

### 26.1 Circuit de l'eau en ce cas

Il apparaît clairement que l'eau de pluie tombant sur un terrain boisé ou recouvert de plantes à racines nombreuses et profondes, donnera lieu à un régime régulier d'humidité au sol ; l'excédent filtrera lentement, régulièrement, et alimentera des sources perpétuelles. Mais si les racines demeurent rares, la filtration s'effectuera vite, le circuit hypodermique<sup>23</sup> demeurera court et, partant, les sources alors accidentelles, suivront un régime torrentiel.



Steppe russe Prikaspiyskaya

Europe's environment

La dénudation du terrain, telle que figurant sur la figure supra, entraînera "ipso facto" un écoulement torrentiel des eaux météoriques, puissant facteur d'érosion du sol de par ailleurs.

### 26.2 Analyse descriptive du couvert végétal :

Elle comportera trois éléments :

---

<sup>22</sup> par rétention, on entend le volume d'eau stocké susceptible d'être restitué à l'écoulement

<sup>23</sup> ὑπο: sous τοδέρμα : la peau

- la densité qui définit si la protection demeure intégrale (céréales, plantes potagères) ou partielle (cas des cultures non couvrantes (vigne, verger).
- la hauteur : on discerne alors les formations buissonnantes, arbustives ou arborées.
- le type : s'il s'agit de formations à feuilles pérennes ou caduques.

### 3 Appréhension de l'alimentation d'un bassin

The day was dull and dreary  
It rains and the wind is never weary  
Be still sad heart ! behind the clouds  
The sun is shining<sup>24</sup>

Longfellow

Bien évidemment l'alimentation s'effectue par les précipitations météoriques tombant sur le bassin-versant concerné : pluie, neige, ... voire parfois par voies occultes : rosée, brouillards, rivière karstique provenant d'un autre bassin-versant

#### 31 Mesures pluviométriques

##### 31.1 Pluviomètre :

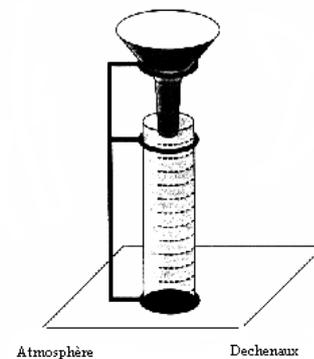
En ce qui concerne les mesures pluviométriques dès 1856, furent installés les premiers pluviomètres. En 1985, cinq mille fonctionnaient.

Les mesures sont pratiquées selon le schéma ci-contre

Calcul de la hauteur d'eau tombée :

soit Q la quantité recueillie en  $\text{cm}^3$  (millilitre)

soit S la surface de l'entonnoir en  $\text{cm}^2$   $H \text{ cm/m}^2 = \underline{Q/S}$

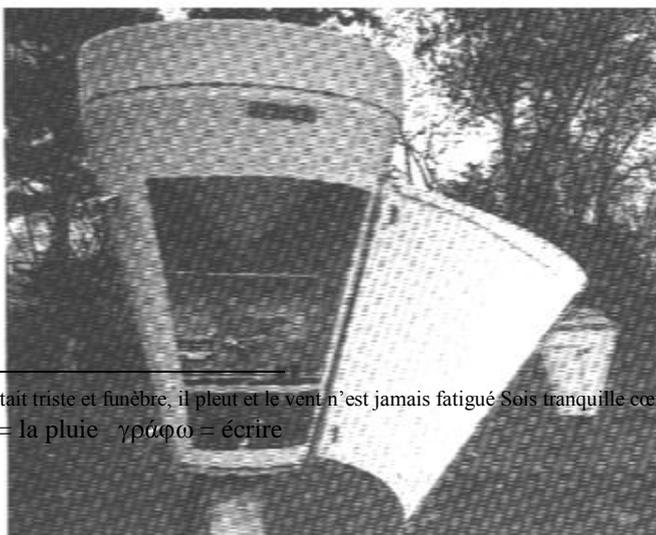


##### 31.2 Pluviographe à augets basculeurs:

L'analyse du phénomène de ruissellement nécessitant une connaissance plus fine des pluies, on utilise surtout des pluviographes<sup>25</sup> enregistreurs, 1 100 fonctionnent en France actuellement.

L'eau de pluie recueillie dans une bague va dans un cône de réception (surface 400, 1 000 ou 2 000  $\text{cm}^2$ ) qui, par un ajustage se déverse dans un auget vidant son contenu quand il a reçu 10 ou 20 g d'eau.

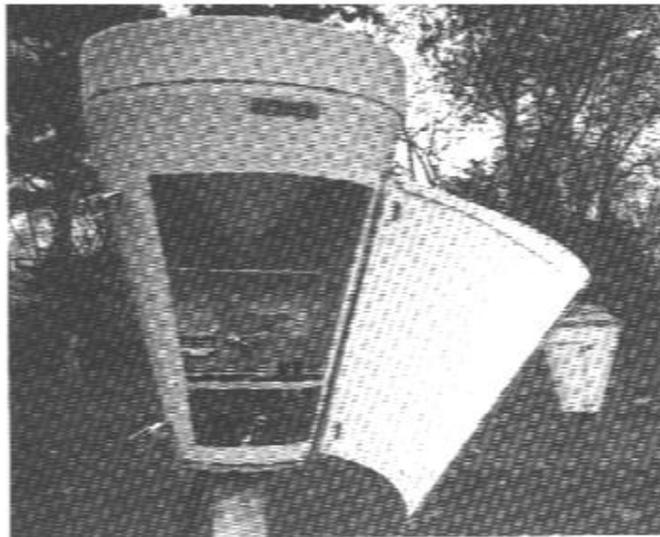
##### Pluviographe avec cône de réception, auget basculeur



<sup>24</sup> Le jour était triste et funèbre, il pleut et le vent n'est jamais fatigué Sois tranquille cœur triste ! derrière les nuages le soleil brille

<sup>25</sup> Pluvia = la pluie γράφω = écrire

### Pluviographe avec cône de réception, auget basculeur



A chaque basculement, un stylet inscripteur se déplace sur un cylindre de papier, en rotation permanente à la vitesse d'un tour/jour.

Le pas de temps des enregistrements -durée de la précipitation enregistrable ne peut être inférieur à la minute.

L'appareil donne une information moyenne sur le pas du temps choisi.

cf. photo ci-contre

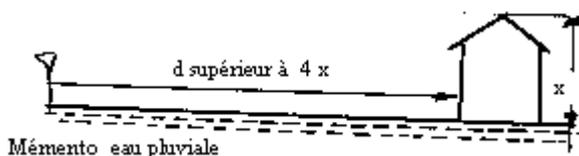
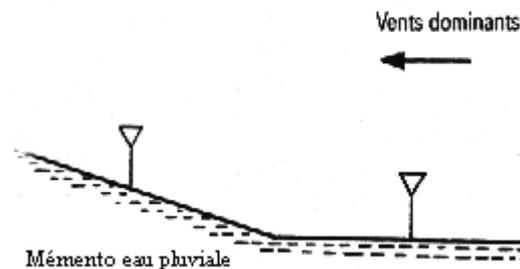
Mémento des eaux pluviales

Service technique urbanisme

### 312.1 Installation des pluviographes

être  
vent  
choisie avec soin., en fonction du  
dominant

cf. schéma ci-contre à réaliser et non  
le contraire



Le croquis ci-contre indique la bonne position à retenir, vis à vis d'un obstacle ici , il s'agit d'une maison

### 31.3 Radar

Une nouvelle méthode de mesure se développe au moyen de radar, fondée sur l'émission d'un faisceau d'ondes électromagnétiques qui se réfléchit sur l'obstacle. Cet appareil appréhende le phénomène à la milli-seconde, effectue une rotation et appréhende à nouveau le phénomène après un temps de rotation de 5 minutes..

## 32 Autres mesures météorologiques

### 32.1 Hygromètre

Quant à l'humidité ( facteur de l'évapo-transpiration) on a recours à un hygromètre<sup>26</sup>

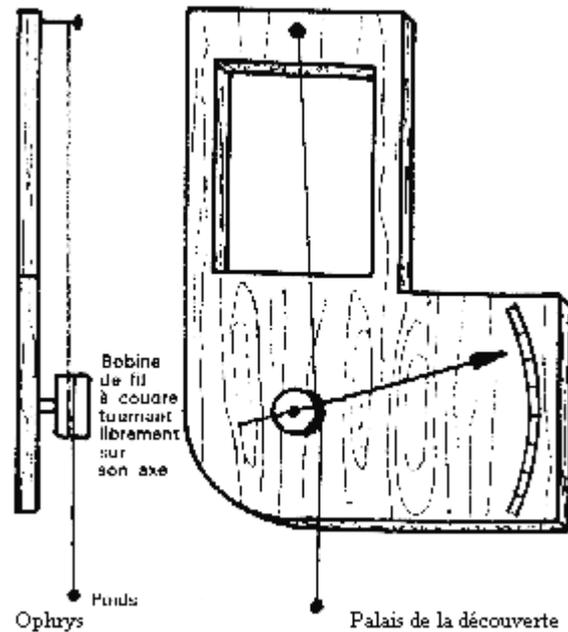
<sup>26</sup> υγρός, ή, ό : humide το μέτρο : la mesure

fondé sur l'allongement des cheveux.

Quand l'humidité s'accroît le cheveu enroulé autour de la bobine entraîne celle-ci et, partant, l'aiguille.

On tare en marquant 100 et en plaçant l'appareil au-dessus d'un récipient d'eau bouillante.

Cf. croquis ci-contre



### 32.2 Anémomètre

En plus des quatre vents correspondant aux quatre points cardinaux, Aristote en avait découvert quatre de plus, d'où la construction d'une tour octogonale dans l'Athènes antique surmontée d'une girouette.

En 1864 suite à un naufrage de bateaux français se rendant à la guerre de Crimée, consécutivement à un ouragan, il fut créé un service météorologie qui utilisa l'échelle Beaufort (du nom d'un amiral anglais) classant les vents de 0 à 12 : 1 nœud = 1852 mètres

force	descriptif	Observation terrestre	Vitessen noeuds	Vitesse en km/h
0	calme	La fumée s'élève verticalement	Moins de 1	De 0 à 1
6	Vent frais	Grandes branches agitées	22 - 27	39 - 49
12	ouragan	Ravages graves et étendues	Plus de 64	Plus de 118

Cette force du vent est mesuré par un appareil appelé anémomètre<sup>27</sup> (enregistrement des tours d'hélice)

On utilise aussi des manches à air pour connaître sa direction.

### 32.3 Héliographe

L'ensoleillement est mesuré par l'héliographe<sup>28</sup>, inventé par Campbell: grâce à la carbonisation d'un papier, on peut suivre la marche quotidienne du soleil.

**33 Connaissance des pluies à partir des mesures** Selon les appareils employés, pluviomètres ou pluviographes, l'on obtient des renseignements différents

#### 33.1 Courbes isohyètes

A partir des relevés des pluviomètres en les combinant avec ceux obtenus en d'autres lieux on peut bâtir des courbes isohyètes<sup>29</sup> (joignant les points d'égale quantité d'eau reçue)

<sup>27</sup> ο άνεμος : le vent

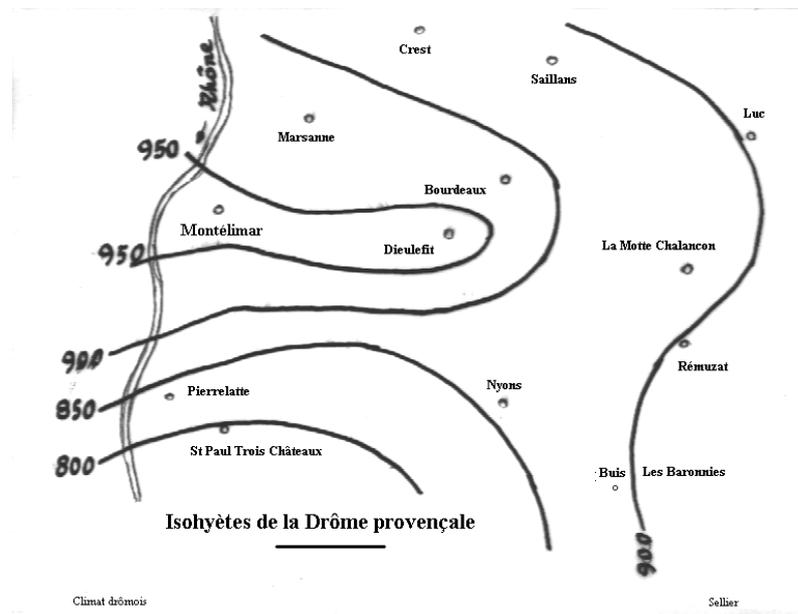
το μέτρο : la mesure

<sup>28</sup> ο ήλιος : le soleil

γράφω : écrire

### 331.1 Dans la région montilienne

L'on a obtenu la carte infra à partir de relevés correspondant à une année de précipitations



### 331.2 Dans le nord Cameroun

Le climat du Cameroun résulte de l'action simultanée de deux centres d'action principaux :

- l'un méridional, l'anticyclone de Sainte-Hélène,
- l'autre septentrional situé sur la Sahara et qui change de nature suivant la saison : de nature dépressive l'été, il se transforme en anticyclone puissant l'hiver (Génieux 1958).

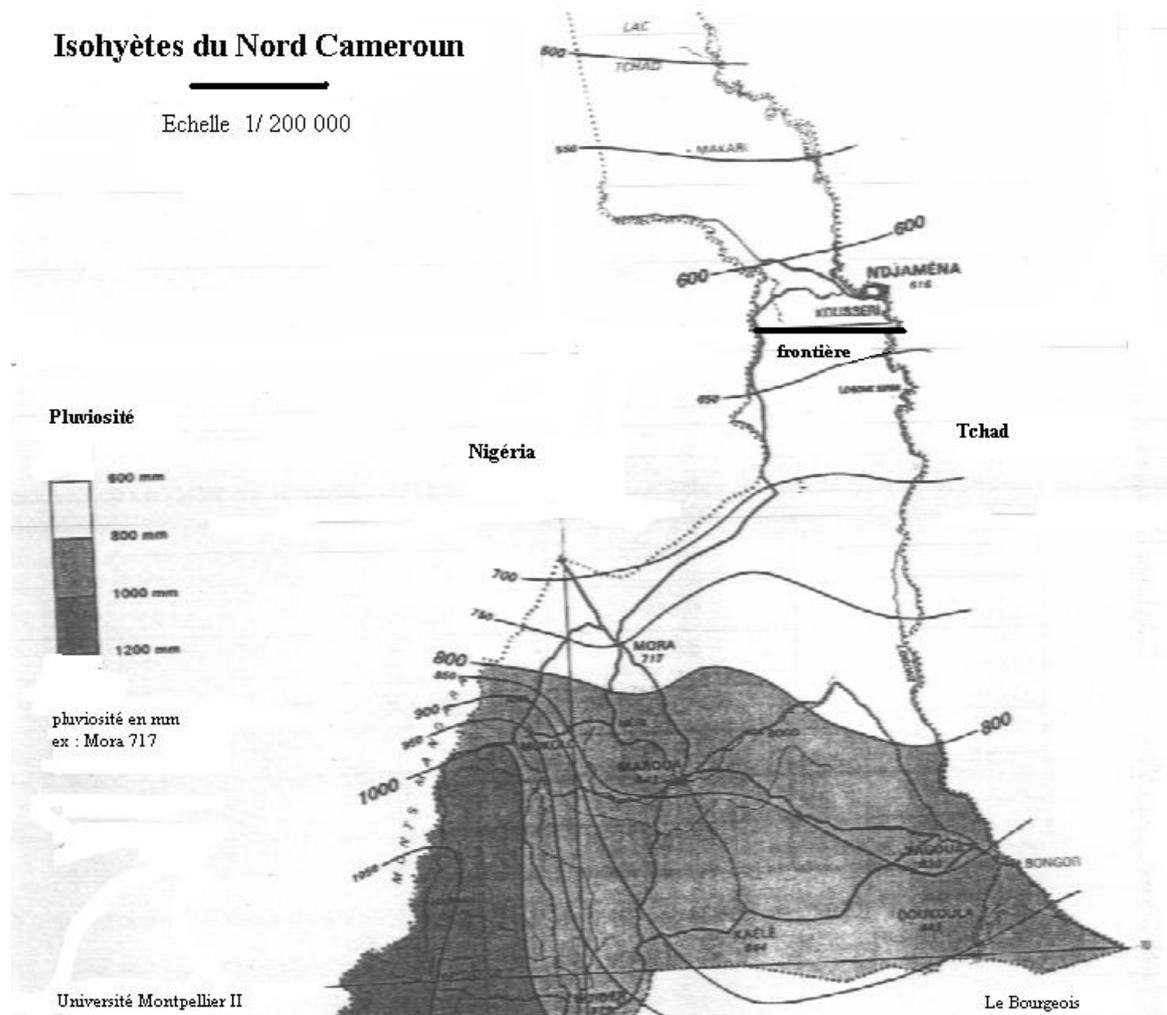
Ainsi deux masses d'air s'opposent : l'une maritime humide, l'autre continentale sèche. A l'interface de ces deux masses d'air se trouve le front intertropical (F.I.T.) Ce front se déplace au cours de l'année depuis le 20<sup>ème</sup> parallèle nord en juillet, jusqu'au 4<sup>ème</sup> parallèle nord en janvier. Cette oscillation saisonnière du F.I.T. se traduit au Nord-Cameroun par trois types de temps :

- ↳ Lorsque le F.I.T. se trouve tout à fait au nord, de juin à septembre, le ciel est couvert ou très nuageux, avec des orages de grains, ou en lignes de grains. Ce sont les pluies zénithales.
- ↳ Lorsque le F.I.T. se situe vers le 10<sup>ème</sup> parallèle en avril-mai et en octobre-novembre, le ciel est peu nuageux avec quelques cumulus peu développés.

<sup>29</sup>ἴσος,η,ο : égal

ο νετός : l'averse

↳ Lorsque le front est tout à fait au sud de sa trajectoire, de décembre à mars, le ciel est clair ou peu nuageux avec de rares cirrus. A cette époque souffle l'harmattan du nord-est, chaud, sec et chargé de poussières.



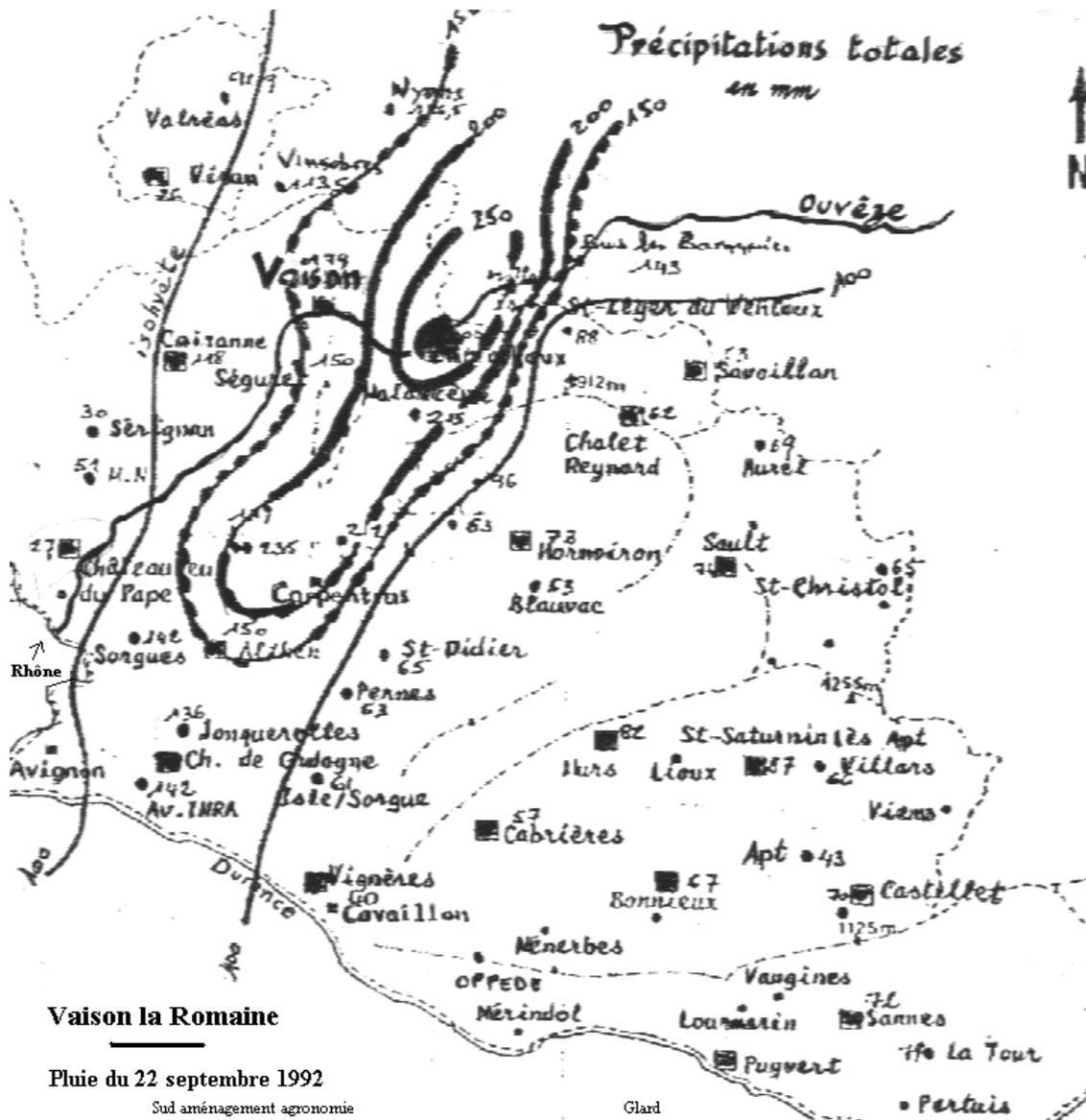
Le Nord-Cameroun se trouve, par le jeu des oscillations annuelles du front intertropical, sous un climat tropical à une saison des pluies. L'étirement en latitude de la région induit un gradient important tant dans la durée de la saison des pluies que dans l'importance des précipitations et inversement de la saison sèche.

En même temps que les précipitations diminuent, les contrastes thermiques s'accroissent. Les amplitudes assez faibles dans l'Adamoua, s' lvent progressivement vers le nord ; limitées à 3  C entre les moyennes mensuelles à Ngaoundéré, elles atteignent 6  C   Garoua et Maroua et 9  C   Kousseri. Les variations apparaissent comme plus sensibles encore en considérant les moyennes des maxima et des minima.

Les variations saisonnières de la photopériode sont faibles par 9 22 de latitude. La durée d'insolation de 12h12 en juin diminue à 11 h en décembre, soit une variation de 72 mn d'insolation. Les variations inter annuelles de température sont peu sensibles et de faible influence sur les activités rurales. Il en est tout autrement des fluctuations inter annuelles et saisonnières de la pluviométrie, surtout marquées dans la partie septentrionale de la zone. Les déficits pluviométriques enregistrés en 1983 et en 1990 étaient de 45% et 35% à Mora alors qu'ils n'étaient que de 17% et 0% à Touboro. Leur impact sur les activités agricoles est d'autant plus fort que l'on se trouve dans des régions où la pluviométrie est limitée.

### 331.3 Isohyètes paroxystiques de Vaison la Romaine

Enfin les "pluies paroxystiques" - cas de pluies localisées- de type 154 mm en 3 heures, créent des crues, quelque soit le degré de perméabilité du sol, donc leur gravité restera la même. Tel fut le cas de Vaison-la-Romaine le 22 septembre '92. voir infra les courbes isohyètes de la zone et en particulier celles du bassin-versant de l'Ouvèze cours d'eau traversant cette ville.



Ces isohètes paroxystiques furent établies à partir du tableau infra fondé sur des pluviographes avec un pas de temps de six minutes.

**Orages du 22 septembre '92**

( hauteurs des précipitations par pas de six minutes ( en mm et en dixième)

Les totaux partiels des épisodes orageux figurent entre parenthèses

Heures TU	Carpentras	Vaison	Buis les Baronniees
8h54	16,4	4,5	
9h00	7,4	14,0	
9h06	5,2	2,5	2,6
9h12	5,0	2,0	10,0
9h18	7,0	1,0	2,0
9h24	0,2	0,5	0,6

9h30	0,2 (41,4)	(24,5)	0,4 (15,6)
9h36			
9h42			
9h48	0,2		0,8
9h54	0,2		0,2
10h00			0,2
10h06	0,2		
10h12	0,8 (1,4)	0,5 (0,5)	(1,2)
10h18			0,2
10h24	0,4	1,5	
10h30	3,4	2,5	0,2
10h36	2,8	1,5	0,2
10h42	1,0	4,0	0,4
10h48	0,2	10,0	1,2
10h54		3,5	0,8
11h00		4,0	
11h06	1,0	7,0	3,4
11h12	12,8	5,0	0,2
11h18	18,4	9,0	
11h24	14,6	9,0	
11h30	8,0	5,5	8,8
11h36	11,2	5,0	14,8
11h42	4,6	6,5	12,6
11h48	1,0	5,0	5,4
11h54	0,8	8,0	12,0
12h00	0,8	8,5	11,4
12h06	8,4	7,0	4,8
12h12	13,2	9,0	1,6
12h18	16,4	6,0	7,2
12h24	15,2	8,0	6,6
12h30	19,4	6,0	8,4
12h36	5,0	6,5	5,2
12h42	3,0	7,0	4,2
12h48	4,2	4,0	4,2
12h54	1,2	2,5	5,0
13h00	1,2	1,0	2,0
13h06	0,4	0,5	1,4
13h12	0,4	0,5	1,0
13h18		0,5	0,8
13h24			0,4
13h30	(169,0)	(154,0)	0,4 (124,6)
<b>Total en mm</b>	<b>212</b>	<b>179</b>	<b>142</b>

Pour des pluies non paroxystiques mais importantes, notons que la pluviosité instantanée ne joue pas un rôle nécessairement déterminant : une grosse averse de probabilité moyenne, suivant une période très pluvieuse pourra déclencher une crue aussi bien qu'une trombe d'eau, de très faible probabilité de retour s'abattant sur un sol desséché. Ainsi en 1951 à Montélimar du 6 au 13 novembre : 88 mm, puis 60,5 mm le 18 et 39,7 mm le 19 novembre.

#### **N.B. Précipitations occultes**

Elles peuvent diminuer les besoins en eau des cultures : rosée, eau des brouillards (toile d'araignée) ; ce sujet sera développé dans le "mémento"

### **33.2 Modules**

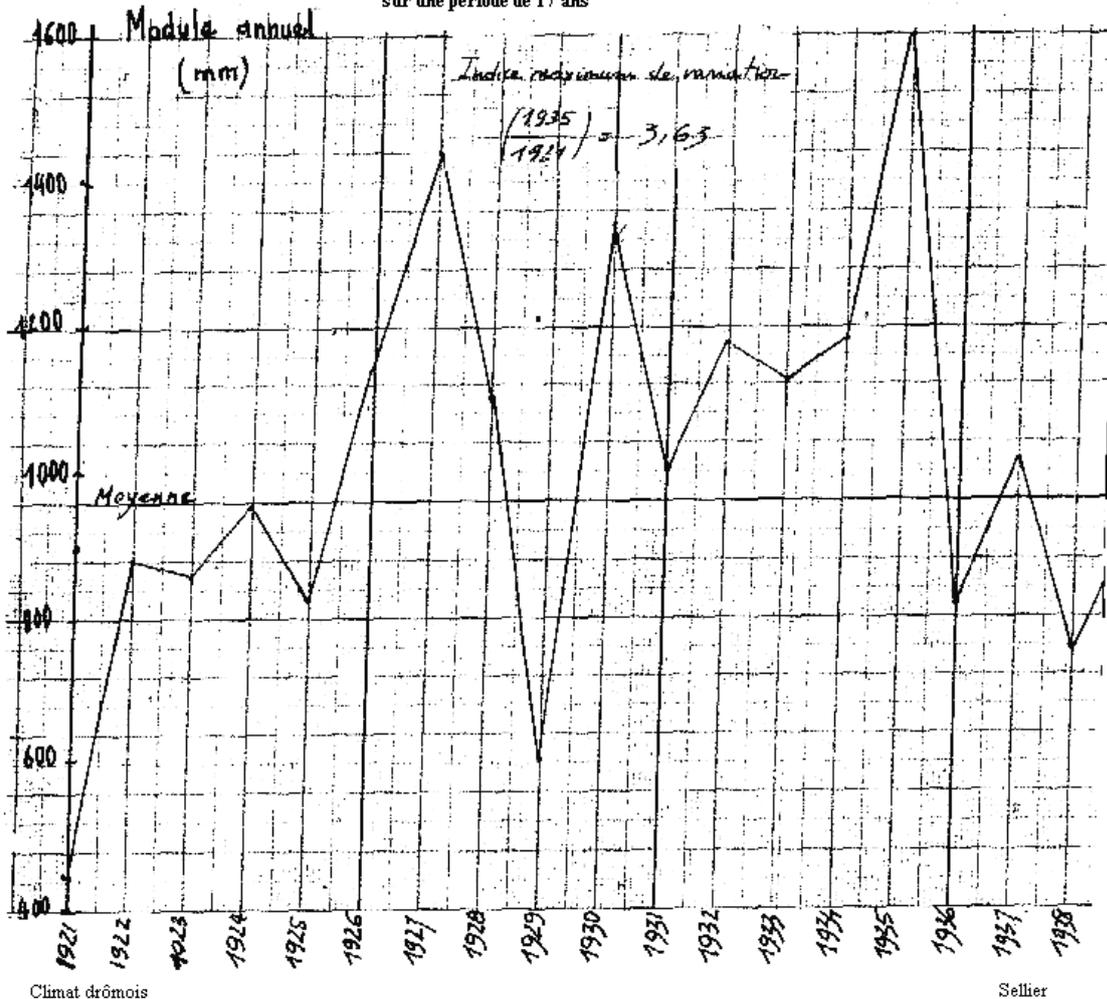
Ils correspondent à la hauteur moyenne, souvent annuelle, établie sur des mesures effectuées pendant une durée de temps donnée : 5 ans, 15 ans etc....

**332.1 A Montélimar**

Dans le graphique infra il s'agit des moyennes des précipitations annuelles à Montélimar, donc selon un module annuel, et ce, sur une durée de 17 ans.

**Variation des précipitations annuelles à Montélimar**

Le module moyen 960 mm indique la hauteur moyenne annuelle évaluée par la moyenne des hauteurs d'eau annuelles mesurées sur une période de 17 ans

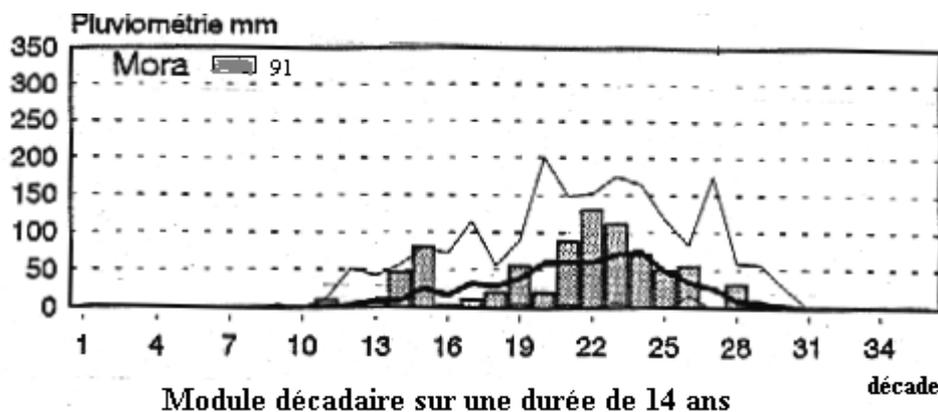


Climat drômois

Sellier

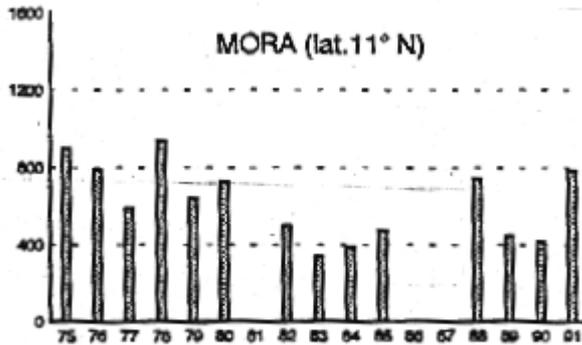
**332.2 A Mora ( Cameroun)**

Les précipitations ont été enregistrées sur une durée de 14 ans entre 1975 et 1991



Le trait épais correspond au minimum.  
 Le trait fin correspond au maximum.

Module annuel sur une durée de 14 ans



Le graphique ci-contre représente le module annuel observée sur une durée courant de 1975 à 1991.

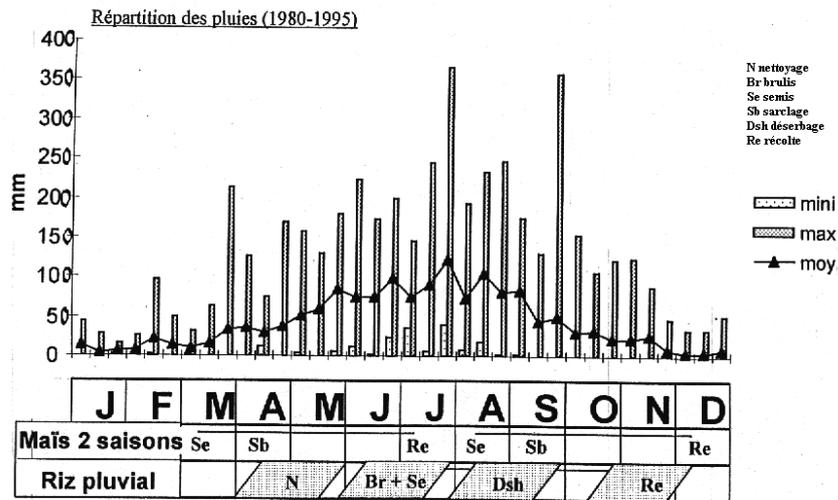
Université Montpellier II

Le Bourgeois

### 332.3 Au Tonkin

Soulignons **une application agricole** de la connaissance de la répartition des pluies au Tonkin

Module mensuel sur 15 ans et calendrier des cultures au Tonkin



Université Montpellier II

Stevoux

à partir d'un module mensuel sur une durée de 15 ans. (cf. figure infra)

Le village de Ban Cuon ( pluviométrie annuelle moyenne : 1500 mm) est soumis à un climat subtropical de zone de montagne caractérisé pas deux saisons distinctes qui rythment la vie et les activités des habitants (Bal *et al.* 1997).

- La saison des pluies ( chaude) d'avril à septembre :la température moyenne est de 24 à 27° C. Les maxima atteignent parfois 38,8°C . C'est en juillet et en août que les précipitations sont les plus importantes avec 51 % du total de la saison. Les fortes pluies de juillet (263 mm en moyenne) et août durent deux à trois heures et provoquent des phénomènes d'érosion en griffes et ravines par ruissellement concentré gênant l'installation des cultures sur les terres en pente. Parallèlement, cette saison s'accompagne de périodes de grand soleil pouvant induire des déficits hydriques pour les cultures.

C'est pendant la saison des pluies que les agriculteurs cultivent le riz pluvial et le maïs (manioc, rizière, jardin).

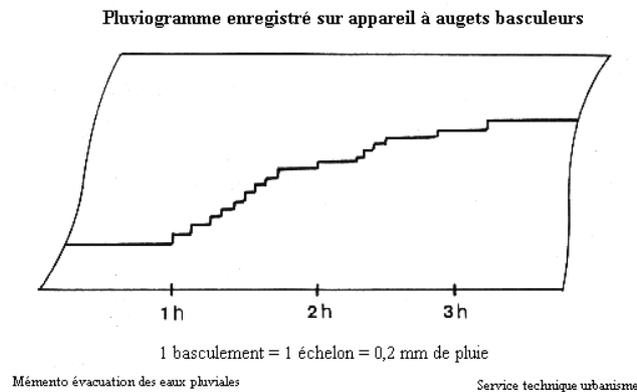
- La saison sèche ( froide) d' octobre à mars caractérisée par quelques pluies éparses et de forts brouillards. Les précipitations mensuelles varient entre 1 mm (en décembre) et 70 mm. La température est basse et instable

avec une moyenne de 15°C, elle descend parfois à -1°C. Les mois de décembre et janvier connaissent les plus faibles précipitations et les plus basses températures.

A cette saison, les champs, sont laissés en jachère et une flore adventice à germination automnale, dominée par *Conyza sumatrensis* se développe.

### 33. 3 Pluviogramme

Les enregistrements sur papier ou pluviogrammes<sup>30</sup> restent très répandus, chaque encoche



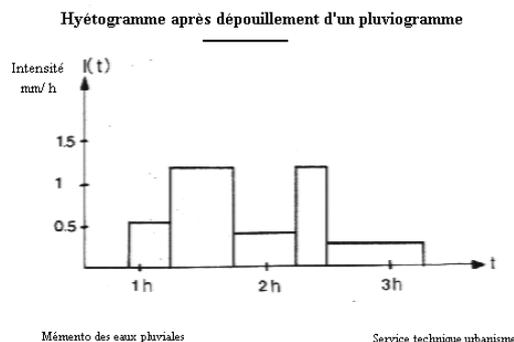
représentant 0,2 mm hauteur de pluie, voir infra

Au lieu d'un cylindre on peut installer un système électrique, des systèmes de cassettes ont retenu la préférence des utilisateurs.

### 33. 4 Hyétoigramme

A partir des pluviogrammes, on obtient sur une période donnée, un hyétoigramme<sup>31</sup>, graphique en échelon visualisant les variations de l'intensité moyenne de la précipitation en f(temps)

$$I = \frac{\Delta H}{\Delta t} \text{ en mm/heure}$$



### 33.5 Courbe " intensité - durée – période de retour "

L'hydrologue s'intéresse à la pluie au travers des conséquences en termes de ruissellement. Les niveaux requis de connaissance de la pluie restent très dépendants des objectifs visés

Le débit à évacuer représente une variable fortement corrélée avec l'intensité moyenne de la pluie sur une durée caractéristique. Cela apparaît dans l'exemple suivant, concernant Bourg en Bresse.

L'analyse de l'**intensité maximale** de la pluie pour différentes durées  $\Delta t$ . (dite "durée de référence") a été effectuée sur les 147 averses enregistrées à la station de Bourg en Bresse (Majornas).

<sup>30</sup> Pluvia = la pluie το γράμμα = la ligne

<sup>31</sup> ο υετός : l'averse το γράμμα : la ligne

Les intervalles de référence  $\Delta t$  retenus furent 5, 10, 15, 20, 30 minutes, 1 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h.

Les hauteurs de pluie utilisées furent celles tombées au cours de ces durées de temps, d'origine variable, qu'il ait plu sans arrêt ou non pendant la durée de référence.

Dans chacune des 147 averses et chaque durée, on a classé les intensités I, par ordre de grandeur décroissante et retenu l'intensité maximale.

Ensuite pour chacun des durées  $\Delta t$  considérés, on a classé les intensités maximales par ordre de grandeur décroissante en utilisant les valeurs résultant du classement précédent, sans s'attacher à conserver l'individualité de chacune d'elles (classement non chronologique).

Le classement est résumé dans le tableau infra qui ne reprend que les 11 plus fortes valeurs.

### Intensités maximales en mm/minute

#### **Durée ou Pas de 5 minutes**

1,690	1,663	1,529	1,330	1,304	1,255	1,233	1,224	1,220	1,171	1,164
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### **Durée ou Pas de 10 minutes**

1,256	1,214	1,189	1,109	1,072	0,987	0,978	0,964	0,964	0,939	0,920
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### **Durée ou Pas de 15 minutes**

1,184	1,010	0,905	0,891	0,868	0,857	0,832	0,826	0,826	0,796	0,753
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### **Durée ou Pas de 20 minutes**

1,077	0,862	0,824	0,779	0,772	0,759	0,742	0,724	0,694	0,677	0,613
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### **Durée ou Pas de 30 minutes**

1,019	0,725	0,714	0,654	0,578	0,565	0,558	0,532	0,509	0,505	0,485
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### **Durée ou Pas de 60 minutes**

0,920	0,438	0,428	0,399	0,346	0,342	0,335	0,327	0,316	0,305	0,289
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### **Durée ou Pas de 180 minutes**

0,372	0,238	0,209	0,197	0,192	0,176	0,175	0,174	0,165	0,153	0,146
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### **Durée ou Pas de 360 minutes**

0,197	0,139	0,133	0,133	0,131	0,129	0,117	0,117	0,105	0,099	0,099
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### **Durée ou Pas de 720 minutes**

0,100	0,081	0,074	0,074	0,071	0,071	0,067	0,065	0,064	0,063	0,062
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### **Durée ou Pas de 1440 minutes**

0,050	0,047	0,045	0,043	0,038	0,038	0,037	0,037	0,036	0,036	0,035
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

### **335.1 Méthode de calcul de la période de retour**

Rappelons que probabilité d'apparition =  $\frac{\text{nombre de cas où l'événement s'est produit}}{\text{nombre de cas où il aurait pu se produire}}$

:  $\frac{1}{\text{probabilité d'apparition (dépassement) de l'intensité MAX}}$

Dressons un tableau donnant les intensités maximales en mm/minute en fonction de la durée des averses de référence de 5 minutes et de la période de retour.

Le cadre infra fournit les 11 intensités maximales en mm/minute classées en valeur décroissante pour une averse d'une durée de 5 minutes sur une période de mesures de 11 ans

1 ère	2ème	3ème	4ème	5ème	6ème	7ème	8ème	9ème	10ème	11ème
1,690	1,663	1,529	1,330	1,304	1,255	1,233	1,224	1,220	1,171	1,164

- La 1ère plus grande averse observée = 1, 690 mm/minute UNE averse observée lui est supérieure durant les 11 ans, elle a une probabilité d'apparition en dépassement d'UNE FOIS en 11 ans soit...  $1/11 = 0,09$

Le temps de retour étant l'inverse de la probabilité d'apparition en dépassement sera...  $1/0,09 = 11,1$  ans

- La 5<sup>ème</sup> plus grande averse observée = 1, 304 mm / minute, CINQ averses observées lui sont supérieures durant les 11 ans, elle aura une probabilité d'apparition en dépassement de CINQ fois en 11 ans soit ....  $5/11 = 0,45$

Le temps de retour étant l'inverse de la probabilité d'apparition en dépassement sera...  $1/0,45 = 2,2$  ans

- La 11ème plus grande averse précipitée = 1, 164 mm/minute , ONZE averses observées lui sont supérieures durant les 11ans, elle a une probabilité d'apparition en dépassement d' ONZE fois en 11 ans soit ...  $11/11 = 1$

La période de retour étant l'inverse de la probabilité d'apparition en dépassements  $1/1 = 1$

Il fut procédé ensuite à une **analyse fréquentielle des intensités**, pour chaque intervalle de temps, la période de retour a été obtenue en prenant les N plus grandes valeurs ( N= 11 années d'observation) en les classant par ordre décroissant et en affectant à la plus grande la période de retour  $N + 1$

à la seconde la période de retour  $N + \frac{1}{2}$   
à la x ième la période de retour  $N + 1/x$

On les a représenté sur un graphique portant en ordonnée les hauteurs de pluie et en abscisse les probabilités et on a essayé d'ajuster sur la courbe de fréquence observée différentes lois théoriques de probabilité telles que : Gumbel, Log normale, Pearson ..

L'ajustement selon Gumbel fut finalement retenu ( cf. aperçu d'hydrologie statistique en annexe)

### 335. 2 Traçage de la courbe

Il devient possible de réaliser le traçage des **courbes intensité-durée-période de retour**, les ajustements statistiques précédents permettent de connaître pour chaque durée de pluie ( 5', 10', 15' ..... 24 h ) l'intensité ( hauteur d'eau en mm/heure) présentant la même probabilité de se trouver atteinte ou dépassée donc la même période de retour.

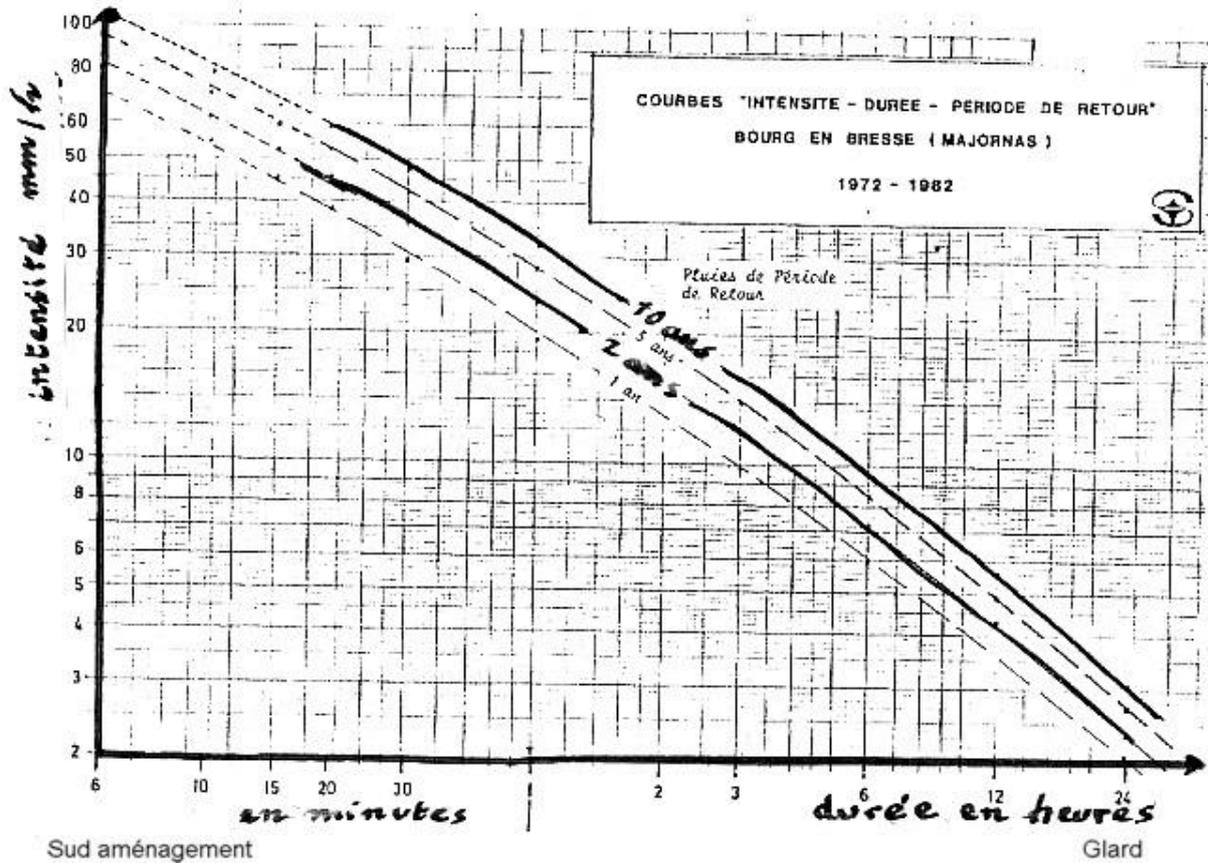
L'on trace dans le système de coordonnées intensité un faisceau de courbes paramétrées en

période de retour T. **En portant :**

en abscisse les **durées** successives des averses : 5 minutes, 10 minutes , etc ....

en ordonnées les **intensités maximales** en mm/ heure ( multipliant par 60 les données observées)

L'on obtient le tracé des courbes intensité maximale, durée des averses, période de retour .



Cf. graphique infra

Ces courbes sont de forme :

$$I = a t^n \quad (\text{Montana}) \quad \text{avec } n \text{ négatif}$$

On l'écrit logarithmiquement aussi

$$\ln I = \ln a + n \ln t$$

### 335.3 Analyse des courbes

On constate que les valeurs apparaissent d'autant plus faibles que l'intervalle  $\Delta t$  apparaît plus long.

Les courbes " intensité-durée-période de retour" fournissant

- pour une période de retour déterminée
- l'intensité maximale  $i_m$  exprimée en mm/heure en fonction de la durée de référence  $\Delta t$

exemple : pour une période de retour de 10 ans une pluie de 30 minutes présente la probabilité d'atteindre une intensité moyenne maximale de ..... 48 mm/h .

Ce qui entraînerait une lame d'eau de ( hauteur d'eau en 30 minutes) de  $48 = 24$  mm

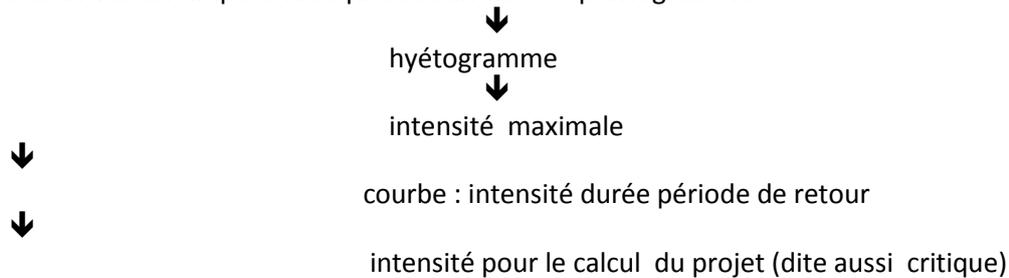
**N.B.** l'utilisateur doit utiliser ces résultats avec précaution

Ces courbes ne peuvent pas être employées pour des durées de retour élevées telles que 25, 50 ou 100 ans, il ne faudrait pas les dilater par un jeu de coefficients<sup>32</sup>.

On pourrait étendre ces courbes pour des durées supérieures à 24 H à partir des publications de la météorologie nationale. Mais pour relier les résultats obtenus à partir d'études statistiques pour des pluies de 48 H, 72 H .... il faudrait utiliser des données sur la même période.

Les courbes ayant été obtenues à partir d'une période d'observations de onze années, donc relativement courte, les erreurs d'échantillonnage ne devraient pas être considérées comme négligeables

En récapitulant, l'exploitation des données pluviométriques en vue du calcul du débit sur un bassin-versant impose la séquence suivante :



### 33.6 Répartition spatio – temporelle

Il ne faudrait pas se satisfaire des chiffres reçus des précipitations annuelles sur un bassin donné, mais en rechercher la répartition spatiale d'autant que les pluviographes ne caractérisent pas finement la variation spatiale des événements orageux

Pour les **pluies quotidiennes** dans le bassin du Jabron, le tableau infra montre qu'il existe de fortes chances que Montélimar et Montjoyer bénéficient du même temps puisque la fréquence des pluies dans la première station atteint 0,400 pour la première contre 0,337 pour la seconde.

La corrélation des pluies journalières à Montélimar et Montjoyer ( 1960 - 1963) représentée infra (module quotidien sur une durée de mesure de 3 ans).

	Montélimar			
	non	oui	non	total
Montjoyer		128	840	968
	oui	457	36	493
	total	585	876	1 461

coefficient de co-variation :  $\frac{457 + 840 - (128 + 36)}{1\,461} = 0,775$

fréquence des précipitations à Montélimar :  $\frac{585}{1\,461} = 0,400$

Montjoyer :  $\frac{493}{1\,461} = 0,337$

Si l'on considère maintenant "**la hauteur d'eau quotidienne dans le bassin**", il apparaît que les petites pluies, donc celles de peu d'incidence sur l'écoulement, surviennent dans l'ensemble du bassin, mais une pluie supérieure à 50 mm en un point, atteindra probablement 10 mm au moins à l'autre bout.

<sup>32</sup> Rappelons les propos de Monsieur Florentin " Il ne s'agirait pas de coefficients de dilatation mais bien de coefficient d'ignorance..."

En ce qui concerne les "pluies localisées", leur influence éventuelle sur l'écoulement dépend à la fois de leur intensité et du degré d'humidité du sol, donc de la saison. Comme l'indique le tableau *infra*, ( module quotidien sur une durée de mesures d'un an) ces averses localisées, surtout inférieures à 1 mm n'influent pas de façon appréciable l'écoulement.

*Nombre de pluies par classe*

*% par classe*

Station	0 - 1mm	1 – 5 mm	+ 5mm	Total	0 – 1 mm	1 – 5 mm	+ de 5 mm
Montélimar- Montjoyer	109	15	7	131	84 %	11%	5%
Montélimar Montjoyer	27	8	1	36	75	22	3
Dieulefit-Montélimar							
Montélimar	116	29	8	153	76 %	19%	5%
Dieulefit	56	16	9	91	73	17	10
Dieulefit-Montjoyer							
Dieulefit	79	20	17	115	68%	18%	14%
Montjoyer	61	18	7	86	71	21	8
Dieulefit-Bourdeaux							
Dieulefit	36	12	5	53	58%	23%	9%
Bourdeaux	18	6	6	30	60	20	20

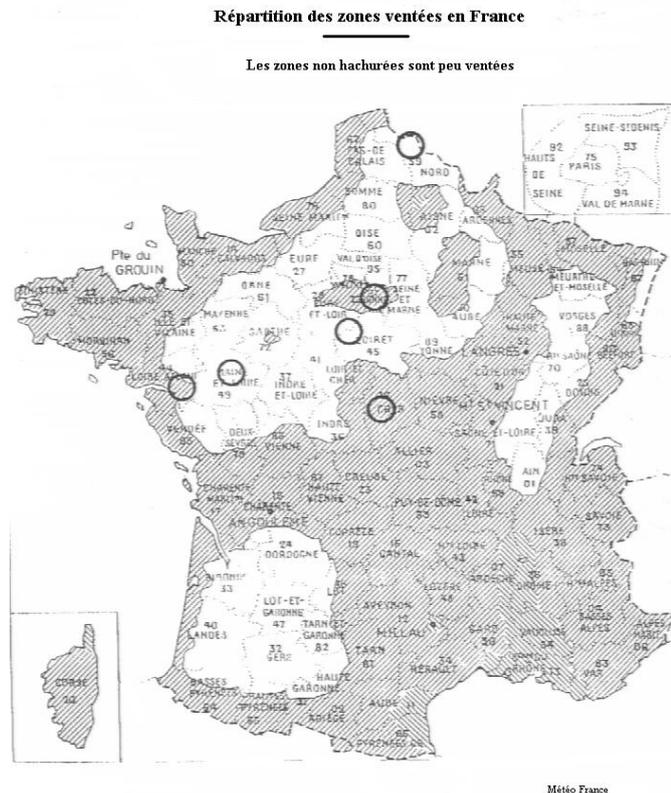
### 34 Connaissance des autres caractéristiques climatiques

Considérant l'aspect hydrologique, il importe de pouvoir appréhender le degré d'efficacité des pluies, compte tenu des vents et de la température lesquels joue un rôle déterminant dans l'évapotranspiration

#### 34. 1 Les vents

##### 341.1 En France

Il a été établi, cf. *infra*, une carte en trois zones indiquant celles où le vent souffle plus ou



moins

### 341.2 Dans la vallée du Rhône

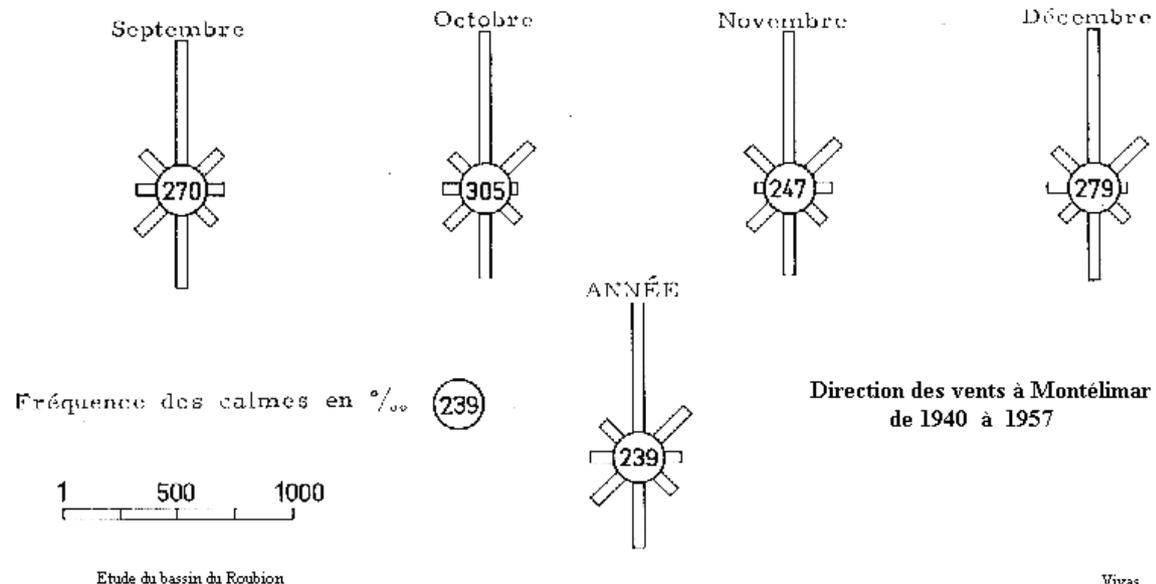
La répartition saisonnière des vitesses des vents donne aussi une indication précieuse. Par exemple, à la lecture du tableau infra, l'on peut penser que les maxima de fréquence du mistral d'hiver et d'été, doivent subsister dans le bassin du Jabron provoquant une évapotranspiration importante au moment où les pluies accusent un recul net.

Répartition saisonnière des vitesses des vents à Montélimar en % sur 7 ans ( 1940- 1947 )

Vitesses m/s	Printemps	Eté	Automne	Hiver
calmes	713	608	822	748
2 à 4	840	882	904	661
5 à 6	493	583	436	410
7 à 14	881	583	436	420
15 à 21	44	24	22	94
21	2,2	0	0	4,2

A propos des vents il faut en déterminer la direction

L'on remarque dans le graphique infra, la prédominance du mistral en hiver (nous nous



trouvons à Montélimar) la faiblesse du vent du sud et l'inexistence des vents d'Ouest et d'Est.

### 34.2 La température

Les "températures" doivent aussi retenir l'attention de celui étudiant un bassin-versant. Les courbes du graphique ci-contre définissent les critères thermiques de Montélimar sur 38 ans.



L'on désigne par évapotranspiration<sup>33</sup> la somme :

$$U = q_t + q_s$$

rapportée à l'unité de surface du sol cultivé et à une période de croissance du végétal , avec  $q_t$ : quantité d'eau transpirée et  $q_s$ : eau évaporée par la surface du sol

Blaney et Criddle établissent une formule de représentation de l'évapo-transpiration de forme :

$$U = K_0 \cdot \theta \cdot T \quad \text{avec}$$

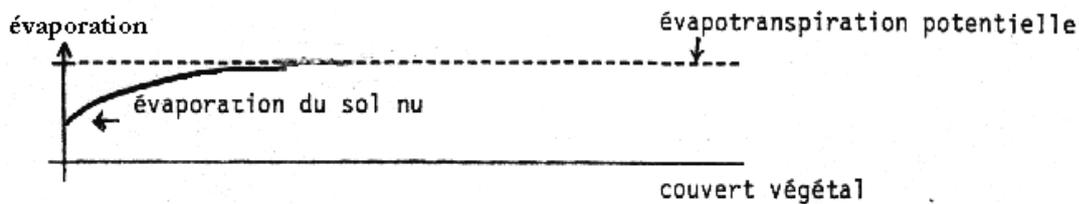
U en hauteur d'eau,  $\theta$  la température moyenne,  $K_0$  une constante f (culture, indice d'aridité) et T la durée d'éclairement

Par durée d'éclairement il faut entendre " l'intervalle de temps où le centre vrai du soleil reste au-dessus de l'horizon". Cet intervalle est égal à 2 fois l'angle horaire H du soleil à l'instant de son coucher.

Or H se définit par :  $\cos H = - \operatorname{tg} \lambda \cdot \operatorname{tg} h$  (  $\lambda$  : latitude du lieu ) h : hauteur du soleil sur l'horizon.

Si h reste compris entre 0° et - 6° l'obscurité demeure partielle

Soulignons enfin que l'évapotranspiration croît avec le degré de couverture végétale, mais a pour limite asymptotique, une valeur appelée "évapotranspiration potentielle".



### Evaporation en fonction du couvert végétal

Pédologie

IUT

#### 343.2 Application des mesures de Montélimar à la rivière Jabron

En lisant infra le nombre d'heures d'ensoleillement à Montélimar sur une période de 31 ans, on peut conclure qu'une forte évaporation doit se produire dans le bassin inférieur du Jabron ; vraisemblablement, elle doit se prolonger dans le bassin supérieur d'autant plus que la lithologie y est favorable.

Répartition mensuelle d'heures d'ensoleillement de 1926 à 1957 (sur 31 ans)

Jan	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	An.
115	140	196	233	264	296	337	301	238	177	114	92	2514

Cette évaporation doit être la cause d'un coefficient d'écoulement faible du Jabron, surtout pendant les mois d'été.

## 35. Regroupement et présentation critères météorologiques

### 35.1 Relevés bruts

<sup>33</sup> Les américains Blaney et Criddle la dénomme " consumptive use "

Dans les stations météorologiques l'on remplit à partir des lectures des relevés incluant : vent, température, pression, ensoleillement, précipitations ;

cf . feuille infra

		Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
<b>Vent</b>	Force ou vitesse	12 0	12 0	12 0	12 0	12 0	12 0	12 0
	Direction							
<b>Température</b> (en °C)		Maxi Mini	Maxi Mini	Maxi Mini	Maxi Mini	Maxi Mini	Maxi Mini	Maxi Mini
	+ 35 30 25 20 15 10 5 0 -5 -10 -							
<b>Ensoleillement</b>								
<b>Précipitation</b>	Hauteur (en mm.)	25 20 15 10 5 0						
<b>Pression</b>	mm de mercure							
	Hecto Pascal	773 1033 769 1025 765 1020 761,5 1015 758 1010 754 1005 750 1000						
<b>humidité</b> (en %)								
		Atmosphère			Dechenaux			

### 35. 2 Climatogramme

Le climatogramme est une représentation graphique du portrait annuel du climat d'un lieu. Il comprend une échelle des températures et des précipitations . Il reflète le climat sur une longue période de mesures. Celui infra relatif à M'Bandjock dans le sud du Cameroun montre les caractéristiques climatiques influant sur une plantaion de cannes à sucre de 19 000 hectares

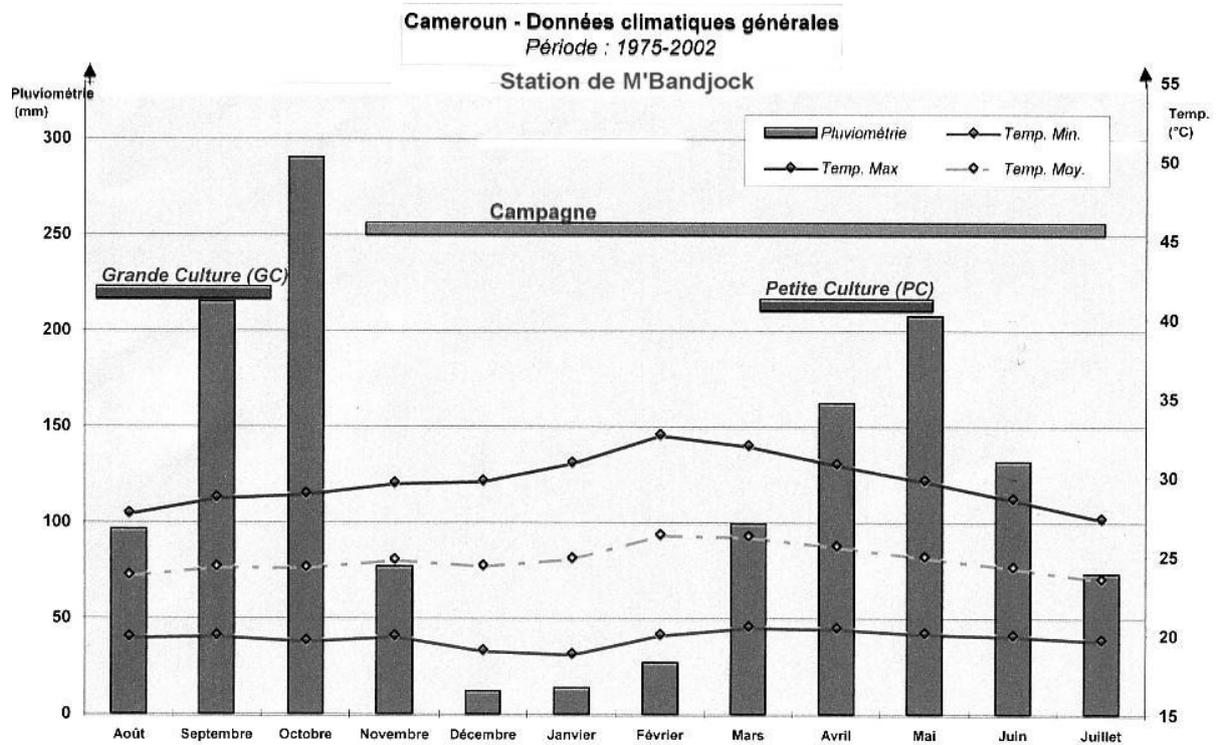
Ce climatogramme présenté sous forme de module mensuel résulte de 27 années de mesure, donc apparaît comme fiable.

Pour cette zone subéquatoriale de type guinéen forestier dont le climat reste fonction du front intertropical (qui se situe au 20 ème parallèle nord en juillet et au 4 ème parallèle nord en janvier ) on remarque :

- la faible amplitude de variation des températures au cours de l'année , ce qui apparaît normal puisque que M' Bandjock se situe au sud du Cameroun donc proche de l'équateur

- l'importance des pluies zénithales tombant d'avril à juin (petite saison des pluies) et en septembre octobre (grande saison des pluies)

Signalons qu'en Afrique, lors des saisons sèches, ici de novembre à mars, l'absence de protection végétale favorise la déflation éolienne et entraîne les " lithométéores " ou **vents de sable** appelés hamattan auxquels succède la brume sèche (poussière en suspension, laquelle, chassée par les vents, peut aller jusqu'aux Antilles).



En récapitulant les facteurs d'évapotranspiration pour déterminer leur impact sur l'eau disponible et partant, sur l'efficacité des pluies, l'on peut lister :

- les vents → direction → vitesse
- les températures → maximum → minimum → moyenne mensuelle
- l'ensoleillement

## 36 Neige glace fonte des neiges

### 36.1 Le processus

Lorsqu'une précipitation météorique intervient avec une température inférieure à 0° l'on passe à l'état condensé de la matière, c'est-à-dire à la phase solide, donc à la neige qui fond plus ou moins rapidement, parfois elle ne fond pas pour raisons d'altitude, et devient alors un glacier.

Les zones d'altitude dans les montagnes sont définies par la décroissance des températures, l'augmentation des précipitations et des radiations.

La zone la plus haute s'appelle "nivale", elle se situe au-dessus de la ligne climatique de la neige. Les glaciers se forment dans des zones d'accumulation.

La neige tombe sur le glacier, est compactée et devient glace, laquelle se dirige vers la vallée. Elle devient à demi plastique dans les régions plus basses appelées zones d'écoulement.

Les zones d'accumulation présentent normalement une surface deux fois supérieure à celle des zones d'écoulement d'aspect semblable à une langue.

Cf. photographie ci-contre

Le glacier joue un rôle climatique, notamment par le **vent**, par exemple le cas de la brise descendante nocturne, alors que la brise montante est diurne.

La surface du glacier est recouverte de **débris** (moraine supérieure) qui sont charriés par le glacier. Il existe aussi des moraines latérales et inférieures. La moraine centrale assure l'écoulement entre deux branches du glacier.



Glacier et langue glaciaire

Autriche

Rendu à une altitude où les températures moyennes dépassent 0°, il se produit fonte et évaporation au front du glacier.

Il paraît opportun d'examiner les résultats de la fonte des neiges, d'une part en Europe, d'autre part au Canada.

### 36.2 Impact nival sur le débit des rivières alpines

Le Rhône prend sa source dans les Alpes suisses au glacier de la Furka, dont la fusion alimente sa source, il s'écoule ensuite en drainant un bassin-versant de... 86 400 km<sup>2</sup>.

Dans le dessein de bien analyser la "variabilité spatio-temporelle du ruissellement", composante essentielle du bilan hydrique voir supra § 33.6, une centaine de postes d'observation furent mis en place dans le bassin-versant, et l'unité de temps fut fixée à un pas de temps de 3 heures. Il fut aussi tenu compte des tributaires du Rhône dont les débits quotidiens subissent fortement l'influence des barrages. L'orientation des versants (ubac, adret) l'altitude et la végétation, la fonte sous forêt différente de celle en prairie, furent pris en considération. Les résultats obtenus par modélisation indiquèrent notamment :

- que la lame d'eau<sup>34</sup> nivale constitue 25 % du débit du Rhône à Beaucaire

- que l'évaporation correspond à 90 % des précipitations en Camargue, mais seulement à 20 % dans les Alpes, ce qui confirme que dans les zones froides du type "toundra", l'évaporation reste voisine de 0.

Toujours dans les Alpes, à Morzine (20 km au sud du Léman), la source de la Chavanette (1850 m d'altitude) ne tarit jamais car elle bénéficie de la fusion nivale via un aquifère calcaire fissuré.

### 36.3 Impact nival par les glaces fluviales au Canada

Au Canada, dès le début de l'hiver, se forment le frasil et la glace de fond, puis la glace de surface, et cela conduit au printemps, à des débâcles et des embâcles qui détruisent les ponts.

<sup>34</sup> lame d'eau =  $\frac{\text{volume écoulé}}{\text{surface bassin}}$ , lame en m, Q en m<sup>3</sup> / sec, à multiplier par 365 (jours) et par 86,4 ‘’, S en km<sup>2</sup>

### 363.1 Processus du gel

Par échange calorifique à la surface d'eau libre, la température de l'eau de la rivière baisse. Le transfert de chaleur dépend des radiations solaires de l'évaporation et des précipitations. Parfois des échanges calorifiques peuvent survenir en raison d'écoulement souterrain de la chaleur géothermique.

Le taux de perte thermique est calculé par le produit :  $(t_{\text{air}} - t_{\text{eau}}) \cdot R$

R varie de 20 à 60 w/ m<sup>2</sup> sur le Saint-Laurent. La formation de glace devient imminente si  $t_{\text{eau}} = 0$

● **Glace de rive**

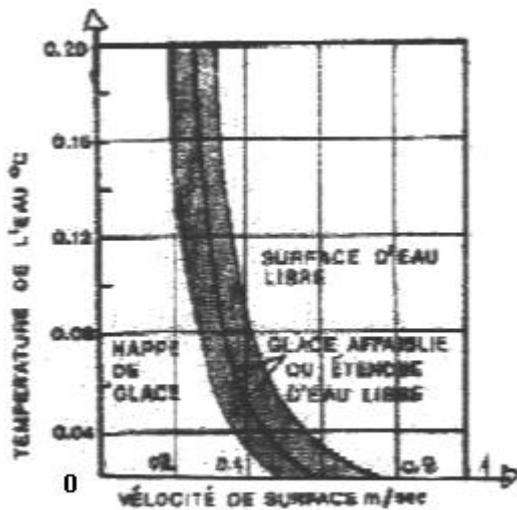
La première glace se forme habituellement le long des rives où la vitesse reste plus faible. La glace de rive s'accroît verticalement et latéralement vers le milieu du cours d'eau



cf. photographie  
 ci-contre

Direction des eaux du Nouveau- Brunswick

Canada



La congélation latérale peut intervenir même si la température de l'eau principale est légèrement au dessus du point de congélation selon la vitesse et les conditions météorologiques. S'il existe une source chaude dans le lit, cas du Danube à Budapest, le fleuve ne gèlera pas en ce point.

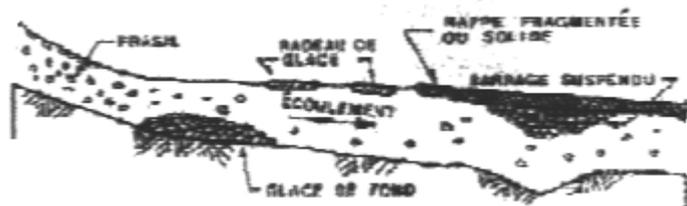
Cf. figure ci-contre

Direction des eaux du Nouveau-Brunswick

Canada

● **Frasil**

Il apparaît souvent du frasil dans les tronçons turbulents sans glace. Il est constitué de petites particules à la suite d'un léger refroidissement rapide de l'eau (à environ - 0,05). La quantité de frasil reste proportionnelle à l'étendue de la surface d'eau libre et au taux de perte thermique.



Direction des eaux du Nouveau-Brunswick

Canada

Dans l'eau rapidement refroidie, les particules de frasil adhèrent les unes aux autres, formant des rochers ou flocons de frasil qui flottent et remontent à la surface. Cette propriété de l'adhérence de particules entraîne habituellement une des formes d'accumulation de glace

Cf. croquis<sup>supra</sup>

"Radeaux de glace" : Au fur et à mesure que les rochers de frasil prennent de l'expansion, ils forment des radeaux de glace, voir photographie infra. Ils peuvent s'arrêter à un étranglement ou s'échouer contre une nappe de glace dans les parties de la rivière où la vitesse reste inférieure à 0,6 m/s - ou - quand le nombre de Froude<sup>35</sup> devient inférieur à 0,08.

$$F = \frac{V}{(g H)^{1/2}}$$

V: vitesse moyenne et H: profondeur moyenne



Direction des eaux du Nouveau-Brunswick

Canada

Si l'eau de surface continue de perdre de la chaleur dans l'atmosphère, ces radeaux de glace gèlent ensemble pour former une couche de glace continue.

"Barrages suspendus" : Si la vitesse du bord en amont de la nappe de glace reste faible, l'accumulation de frasil contre une nappe de glace progresse vers l'amont.

Si la vitesse reste forte, le frasil est transporté en aval, sous la nappe de glace où il adhère dans une zone à faible vitesse. A mesure que l'approvisionnement en frasil continue, l'accumulation sous la nappe s'accroît formant un barrage suspendu. Ce type de barrage peut provoquer un blocage du courant, augmentant les niveaux d'eau en amont.

"Glace de fond" : Ce frasil peut aussi adhérer au lit de la rivière, s'agglomérer, pour former la glace de fond susceptible elle aussi, de bloquer le débit de la rivière.

#### ● Nappe de glace thermique

Dans les rivières, si la vitesse reste inférieure à 0,6 m/s et si les températures demeurent sous le point de congélation, des cristaux de glace se forment à la surface et se lient pour créer une mince couche de glace. Elle commence à s'accroître vers le bas en gelant à l'interface de la glace et de l'eau. La perte thermique est retardée par la nappe de glace elle-même et par la nappe de neige

<sup>35</sup> Le nombre de Froude indique l'influence de la pesanteur sur l'écoulement

qui peut s'y trouver. Lorsqu'une accumulation de frasil gèle, le taux d'épaississement de la couche de glace solide est inversement proportionnel à la porosité de l'accumulation.

### 363.2 Calcul de l'épaisseur de la glace solide

$$h_i = a_i (D_F)^{0,5}$$

$D_F$  : degrés jours<sup>36</sup> accumulés de congélation °C – jours,  $h_i$  en centimètres,  $a_i$  : coefficient empirique

valeur $a_i$	critère
1,7 - 2,4	lac avec neige
1,4 - 1,7	rivière avec neige
0,7 - 1,4	rivière abritée avec débit rapide

### 363.3 Débâcle :

Le temps doux fait fondre la couverture de neige et affaiblit la nappe de glace. Des fissures longitudinales et transversales réduisent la force de la nappe. Le taux de fonte nivale et de précipitations et le ruissellement subséquent influent sur le processus de dégel.

Un taux élevé de fonte nivale et de précipitations suivis d'une augmentation du débit entraîne une débâcle prématurée de la nappe de glace. Cela peut survenir au milieu de l'hiver et entraîner les pires inondations. Par contre, une fonte nivale lente provoque une détérioration graduelle de la nappe et partant, une augmentation progressive du débit.

#### ● Dégel de l'hiver

Des temps pluvieux en février entraînent des débits élevés. Des forces en aval s'exercent sur la glace, causant des dégels localisés, d'où embâcles et inondations. Si par la suite, des températures de congélation surviennent, l'embâcle peut geler et figer sur place. Cela peut entraîner des embâcles pour le printemps suivant.

#### ● Dégel du printemps

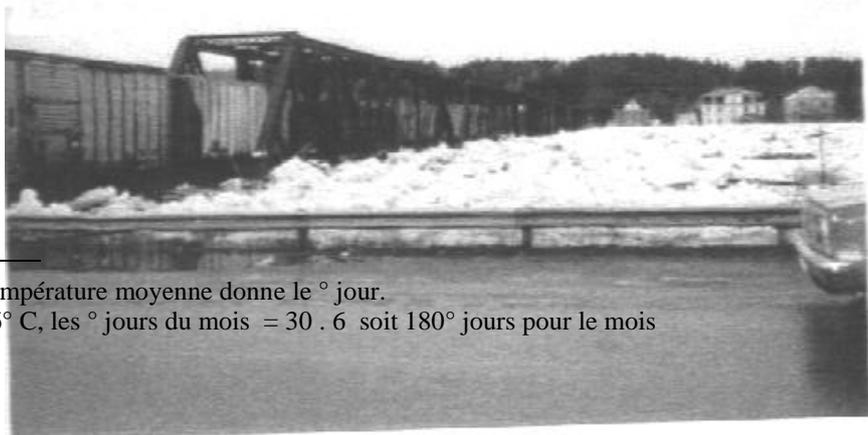
En mars, le réchauffement général dégèle graduellement la nappe de glace. Les précipitations diminuent la force de la nappe et augmentent le débit. Il se forme des fissures en charnière parallèle aux deux rives. Quand les forces exercées en aval augmentent, la nappe de glace se met en mouvement et de la glace en morceaux se dirige vers l'aval. La distance parcourue reste fonction de la météorologie, de la géométrie de la rivière et du débit.

La glace brisée poursuivant son chemin jusqu'à ce qu'elle se dépose en un point de résistance, ainsi étranglement du canal. La durée du séjour de la glace en ce point influe sur la progression de la débâcle.

### 363.4 Embâcle

Les embâcles, amoncellement rapide de glace fragmentée, représentent 70 % des dommages causés au Nouveau Brunswick par les inondations liées à la glace.

Certains points offrent une géographie favorable à ce phénomène : confluent, étranglement, îles, ponts, tronçons de rivière peu profonde, étranglement soudain de la pente de surface de l'eau, par exemple : pont ferroviaire



<sup>36</sup> L'écart entre zéro (gel) et la température moyenne donne le ° jour.

Si  $t$  moyenne mensuelle = - 6° C, les ° jours du mois =  $30 \cdot 6$  soit 180° jours pour le mois

Cf . photo ci-contre

La gravité de l'embâcle demeure fonction du débit de la rivière.

## **Circulation superficielle de l'eau dans un bassin-versant**



### **1 Ruissellement**

- 11. Définitions**
- 12. Ruissellement sur une parcelle**
- 13. Ruissellement à l'échelle terrestre**
- 14. Ruissellement sur un bassin-versant - Coefficients – Déficit d'écoulement**

### **2 Erosion**

- 21. Définitions**
- 22. Historique**
- 23. Mécanisme de l'érosion hydraulique sur une parcelle**
- 24. Mécanisme de l'érosion hydraulique à l'échelle terrestre**
- 25. Mécanisme de l'érosion hydraulique sur un bassin-versant**

### **3 Lamme d'eau**

- 31 Définitions**
- 32 Lamme d'eau sur une parcelle**
- 33 Lamme d'eau sur un bassin-versant**

### **4 Estimation du temps de concentration**

- 41 Intensité critique des pluies représentation graphique**
- 42 Théories du débit de pointe, temps de concentration**
- 43 Spécificité de la transformation pluie-débit**

## **5 Critères concernant le débit**

### **51 Définitions**

#### **52 Expressions du débit**

#### **53 Débit moyen (habituel)**

### **54 Débit de crue**

#### **55 Débit d'étiage**

#### **56 Débit solide**

## **6 Régimes et morphologie des cours d'eau**

### **61 Les régimes**

#### **62 Morphologie des cours d'eau**

## **7 Mesures**

#### **71 Critères de mesures**

#### **72 Mesures de niveau**

#### **73 Mesures de vitesse**

#### **74 Jaugeage ( mesures de débit) des écoulements à surface libre**

#### **75 Mesures de débit solide**

## **8 Le sol**

### **81 Les usages du sol**

### **82 La genèse du sol**

#### **83 Critères concernant le sol**

#### **84 Processus physico-chimique d'évolution**

#### **85 Evolution de la matière organique du sol**

## **9 Initiation à l'usage de**

### **91 Théorie du modèle hydraulique**

### **92 Exemple du logiciel Canal 9**

### **93 Exemple du logiciel Mouse**

# 1 Ruissellement

## 11 Définitions :

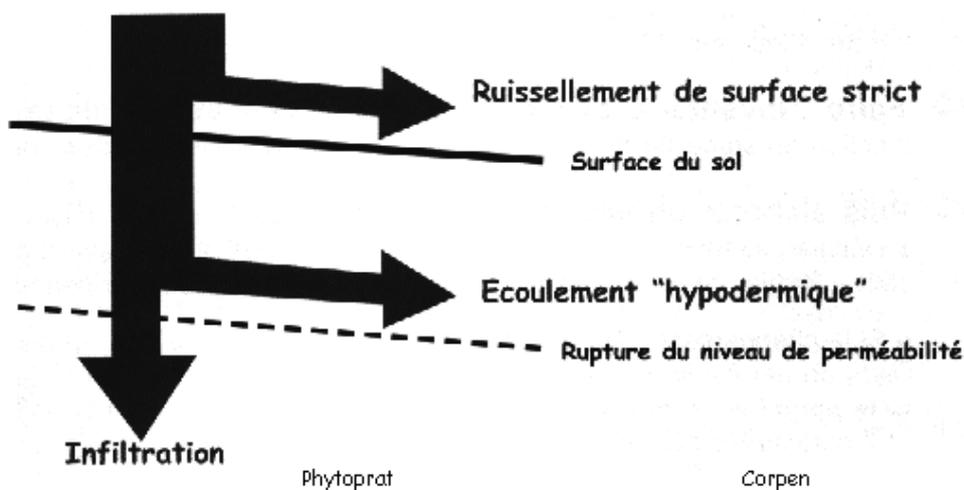
L'eau qui tombe sur un sol nu se trouve susceptible de migrer vers les ressources en eau, par ruissellement, infiltration ou écoulement hydrodermique.

### 11.1 Ruissellement

Les précipitations coulent le long de la surface des terres jusqu'aux ruisseaux et rivières, étangs et lacs qui les ramènent finalement vers l'océan.

### 11.2 Infiltration

L'eau de surface descend ou percole et s'infiltré dans des fissures, des joints, et des pores dans le sol et la roche.



Voir  
figure ci-  
contre

Une partie s'écoule rapidement "écoulement hypodermique"<sup>37</sup>, puis rejoint un cours d'eau. Cet écoulement apparaît si la conductivité hydraulique latérale  $\geq$  la conductivité hydraulique verticale.

L'autre partie passe le seuil de perméabilité ou surface de saturation<sup>38</sup> et devient de l'eau souterraine.

### 11.3 Eau souterraine

<sup>37</sup> ὑπο : sous , το δέρμα : la peau

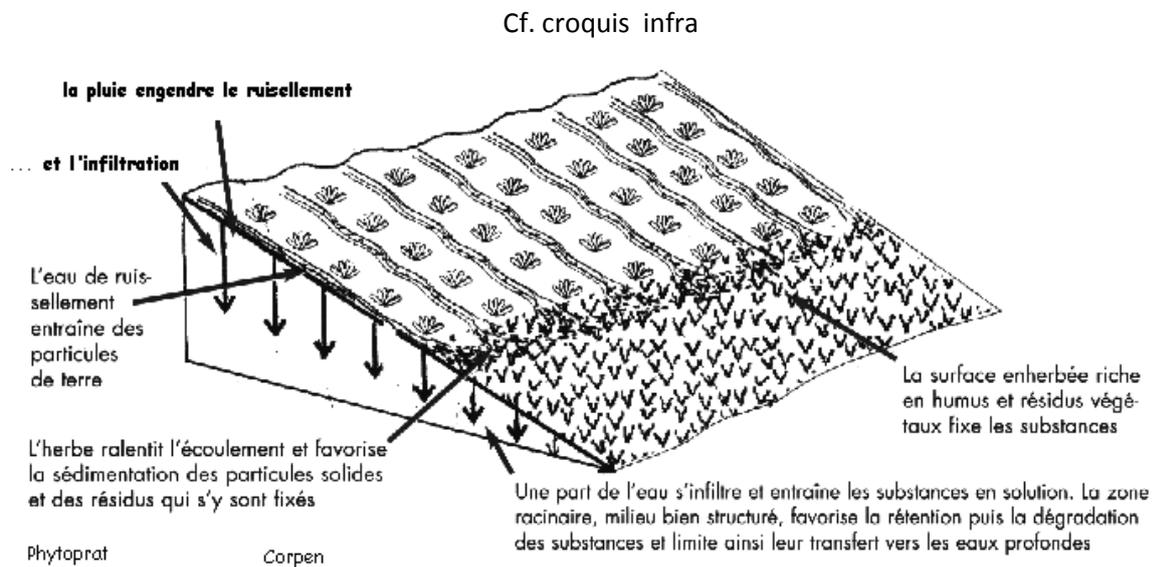
<sup>38</sup> Il s'agit du niveau qu'atteindra l'eau dans un puits ouvert

L'eau souterraine n'est pas seulement emmagasinée, elle se déplace dans le sol pour éventuellement s'écouler de nouveau en surface, parfois rapidement (sols karstiques), parfois très lentement. Elle peut rester au même endroit pendant des milliers d'années.

Par exemple, la source de Sainte Cécile dans le Vaucluse est alimentée par de l'eau cheminant depuis 10 000 ans !

## 12 Ruissellement sur une parcelle

Le schéma infra indique les mouvements de l'eau ruisselée avec ses conséquences micro-géologiques et agricoles sur une parcelle pentue porteuse de cultures dans sa partie haute et d'herbe dans sa partie basse.

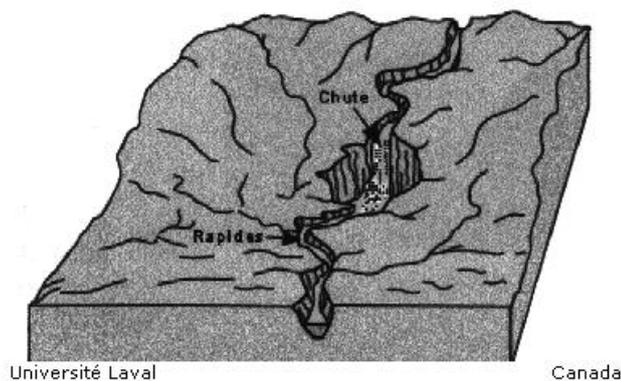


## 13 Ruissellement à l'échelle terrestre

Dans un lit de granit a creusé son chemin  
Et, brisant le rempart de sa rive jalouse  
Du fracas de ses eaux vient étourdir Schaffhouse

Le Rhin ( Lamartine)

Comme le décrit Lamartine dans son épître à Monthérot, placé en épigraphe ; les eaux de ruissellement de talweg en talweg rejoignent la rivière (émissaire). Elles creusent des vallées dont la profondeur, la largeur et la forme sont modifiées avec le temps , d'une forme en V elles passent à une forme en U.



Le stade de la jeunesse d'une vallée fluviale se caractérise par le creusement qui conduit à la formation d'une vallée étroite en forme de V ; les reliefs sont accentués tout le long du cours d'eau et on retrouve chutes, cascades, rapides .... Cf. croquis *supra*

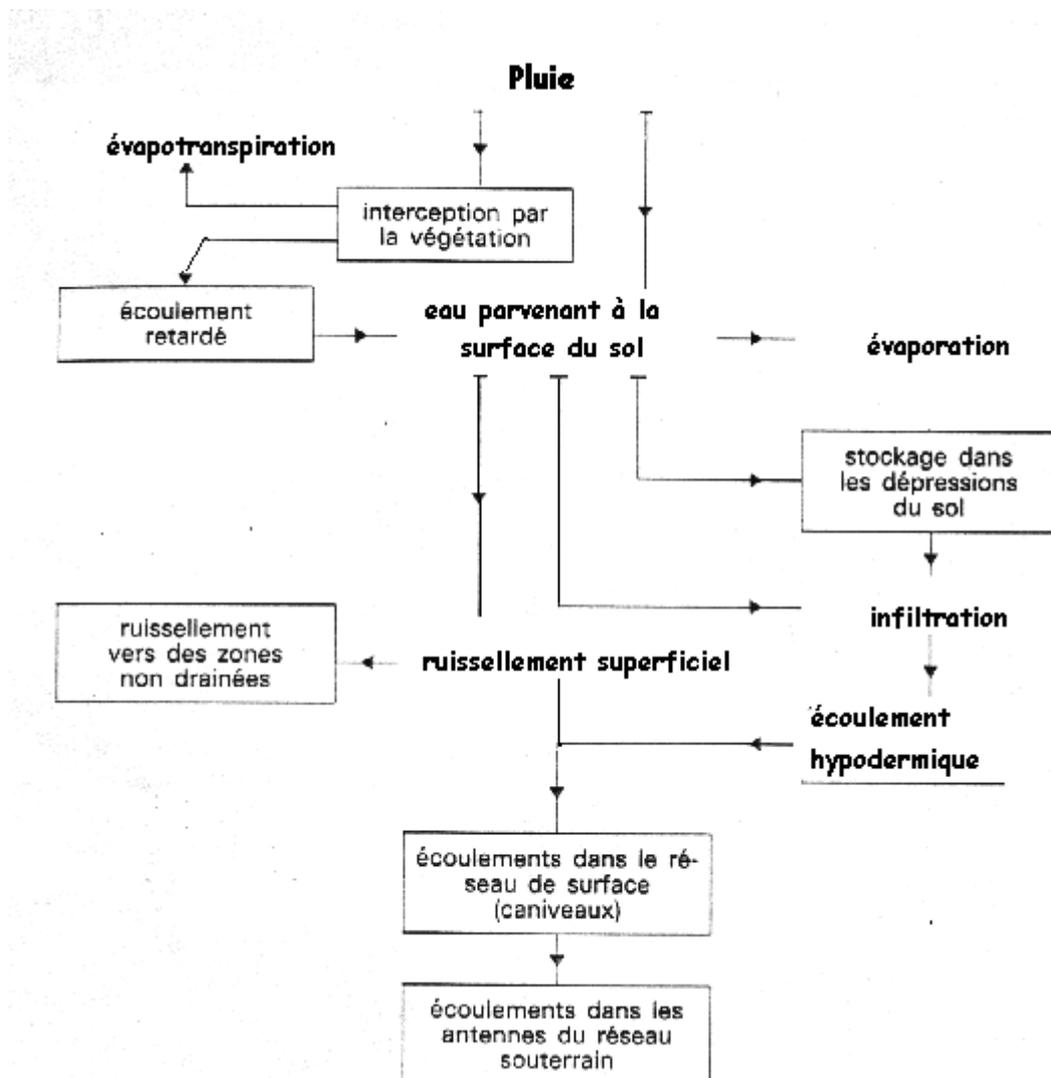
## 14 Ruissellement sur un bassin-versant

### 14.1 Déficit d'écoulement par rapport à la pluie tombée

#### 141.1 Principe

Le bassin-versant transforme une pluie en afflux mais du fait de l'évaporation, de l'infiltration (ou percolation), à l'émissaire<sup>39</sup> l'on ne retrouve qu'une fraction de l'eau tombée puisqu'elle suit les différentes voies indiquées. Cf. tableau *infra*

$$\text{Le déficit d'écoulement} = V_1 (\text{flux entrant}) - V (\text{flux sortant})$$

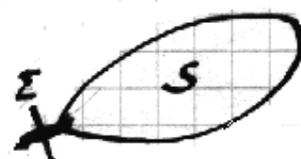


Soit S (ha) la superficie déversant les eaux de pluie dans la partie du talweg en amont de la section  $\Sigma$  de l'émission

soit h (mm) la hauteur de pluie tombée en un temps  $t_p$  (jours)

soit Q (m<sup>3</sup>/s) le débit véhiculé par l'émissaire dans section  $\Sigma$

voir croquis ci-contre



<sup>39</sup> cours d'eau évacuant le drainage de toute une région

Si toute la pluie accède au talweg la section  $\Sigma$  devrait accepter un volume  $V \text{ (m}^3\text{)} = S \cdot 10^4 \cdot h \cdot 10^{-3} = 10 h S$  si  $S$  en ha. et  $h$  en mm

Mais l'afflux réel  $V_1 < V$  ; la différence  $V_1 - V$  ou déficit d'écoulement pour la surface  $S$  représente ET l'évapotranspiration ET la percolation profonde.

#### 141.2 Formule de calcul

Il existe plusieurs formules dont celle de Turc :

$$D = \frac{P}{\left(0,9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{1/2}} \quad \text{avec } L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

$D$  : déficit d'écoulement     $P$  : module annuel de pluie mesuré sur 17 ans     $T$  : la température moyenne annuelle

Par exemple, il a été possible d'estimer le déficit dans le bassin du Jabron, pour la fraction de bassin située à l'amont du limnigraphe de Souspierre A partir d'une pluviosité de 1 015 mm, le déficit obtenu atteint 576 mm.

d'où un coefficient d'écoulement (ruissellement) de  $439 / 1015 = 0,43$  ( $439 = 1\,015 - 576$ )

La surestimation du déficit d'écoulement, défaut souvent constaté, s'avère ici importante, car n'utilisant que deux paramètres : température et pluviosité, la formule ne tient pas compte de la lame d'eau qui, du fait de l'infiltration profonde dans les calcaires, n'est pas soumise à l'évaporation, et cependant est restituée à la rivière.

#### 141.3 Critères de temps

**Soit  $t_r$  (jours)** le temps de ruissellement représentant le temps mis par l'eau tombée au point le plus éloigné de  $S$  pour rejoindre la section  $\Sigma$  de l'émissaire.

**Soit  $t_p$  (jours)** le temps de durée de pluie.

En supposant que l'intensité de la pluie reste la même en tout point de  $S$ , et que le début et la fin de la pluie se produisent au même instant dans tout le bassin.

La durée totale du ruissellement :  $T = t_p + t_r$

**Soit  $T'$**  le temps compté à partir du début de la pluie, nécessaire pour que le débit à travers  $\Sigma$  devienne égal à celui observé à l'époque initiale.

#### 14.2 Afflux de ruissellement. Coefficients de ruissellement ou d'écoulement

Les opérations de colmatage<sup>40</sup> furent lancées par Torricelli pour assainir (comblement des marais) et bonifier (obtention de terre arable) et reprises par Pasini lors des bonifications de Ferrare en 1899 qui explicita les coefficients d'écoulement.

L'afflux de ruissellement à l'émissaire reste fonction du temps et de l'intensité de la précipitation.

#### 142.1 Définition des coefficients de ruissellement en f (temps)

- $K = \frac{\text{volume d'eau reçu à l'émissaire pendant le temps } t_p}{\text{volume total de pluie tombée sur } S}$
- $K_1 = \frac{\text{volume d'eau reçu à l'émissaire pendant } t_p + t_r}{\text{volume total de la pluie tombée sur } S}$
- $K_2 = \frac{\text{volume d'eau reçue à l'émissaire pendant le temps } T'}{\text{débit initial}} = Q$

<sup>40</sup> de l'italien colmare : remplir, les ingénieurs sardes avant 1860, l'appliquèrent à l'Isère et la Dora riparia

<sup>41</sup> débit observé en prenant comme origine des temps le début de la pluie

volume total de pluie tombée sur S

**142.2 Notion d'intensité critique de la pluie ou intensité de projet**

Après avoir enregistré les pluies sur une longue période (20 ans), on dit que : pour une pluie de hauteur h survenant dans le mois de rang n, l'écoulement à l'émissaire, pour la période de

$$\text{ruissellement sera : } K_{1n} \cdot h \cdot S$$

On cherche, dans les observations, la précipitation maximale observée en un jour, soit que la durée de la pluie ait été effectivement en un jour, soit que le jour de pluviosité maximale s'insère dans une période pluvieuse de plus longue durée.

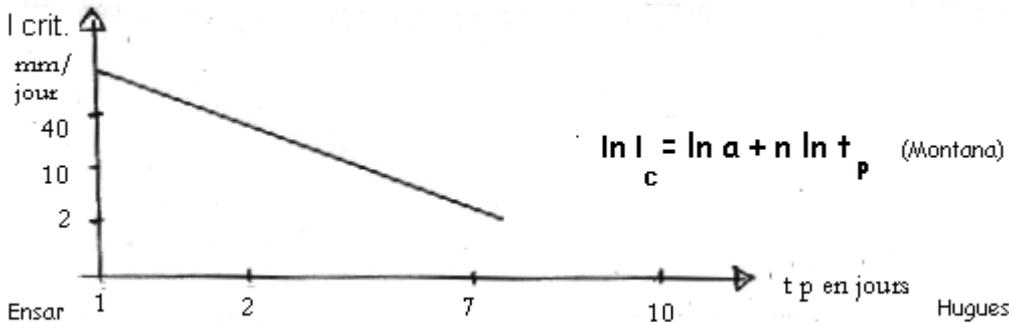
Zampighi insiste sur le fait qu'il ne s'avère pas nécessaire de considérer des périodes de pluie dépassant 5 jours.

Soit un intervalle de n jours consécutifs, avec précipitations chaque jour, h hauteur quotidienne f (jour considéré)

la hauteur totale des précipitations,  $H = \int_0^n h dt$

l'intensité  $I(n \text{ jours}) = \frac{H}{n} = \frac{1}{n} \int_0^n h dt$  avec  $\frac{dI}{dt} < 0$

Si on porte les pluies d'intensité maximales sur un graphique l'on obtient la courbe des premiers cas critiques cette courbe est décroissante : plus la durée de la pluie est longue → plus son intensité est faible.

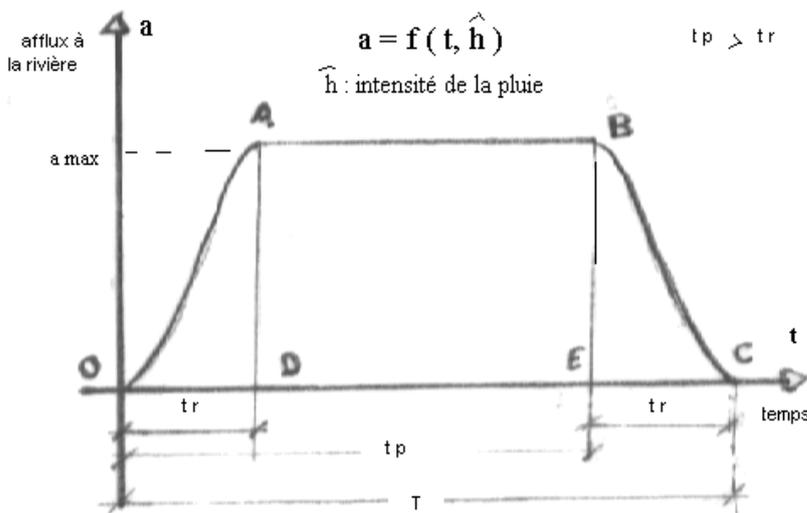


Cf. graphique ci-contre en coordonnées logarithmiques

en coordonnées orthonormées, l'on obtiendrait une courbe de forme  $I_c = a (t_p)^n$  dite de Montana

**142.3 Afflux de ruissellement à l'émissaire si  $t_p > t_r$  à intensité critique de pluie constante  $\hat{h}$**

La courbe a (t) est représentée par un diagramme OABC comprenant : une courbe OA croissante, un palier d'ordonnée  $a_1$ , une courbe BC décroissante qui se déduit de OA par une translation AB d'amplitude  $(t_p - t_r)$  suivie d'une symétrie par rapport à EB.



La courbe OA est de la même forme :  $a = f(t, \hat{h})$  avec  $\hat{h}$  = intensité de pluie .

Par une intensité de pluie donnée, le point (t, a) décrit la courbe OA qui n'est limitée vers le haut que par le temps t de ruissellement .

cf . graphique ci-contre

Posons  $\varphi(t, \hat{h}) = \int_0^t f(t, \hat{h}) dt$

L'afflux de ruissellement à l'émissaire pendant le temps (0, t<sub>r</sub>) est  $\varphi(t_r, \hat{h})$

Le diagramme OABC donne en utilisant les coefficients K et K<sub>1</sub>, cf . § 142 .1 supra

afflux reçu (t<sub>p</sub> + t<sub>r</sub>) - afflux reçu (t<sub>p</sub>) = afflux reçu (t<sub>r</sub>)

aire OABC - aire OABE =  $\varphi(t_r, \hat{h})$

K<sub>1</sub> Sh - K Sh =  $\varphi(t_r, \hat{h})$  avec h : hauteur de pluie

K<sub>1</sub>Sh -  $\varphi(t_r, \hat{h})$  = K Sh

d'où  $K = K_1 - \frac{\varphi(t_r, \hat{h})}{Sh}$  ou  $K = \frac{K_1 - \varphi(t_r, \hat{h})}{S \cdot \hat{h} t_p}$

car  $\hat{h} = \frac{h}{t_p}$

● Quand la durée de la pluie devient grande comparativement au temps de ruissellement et K → K<sub>1</sub>

● Pour une pluie d'intensité déterminée  $\hat{h}$ , l'afflux de ruissellement à l'émissaire garde une valeur invariable si la durée de la pluie devient supérieure au temps de ruissellement. Cette valeur a<sub>max</sub> représente le maximum d'afflux de ruissellement à l'émissaire pour une pluie d'intensité  $\hat{h}$ ..

**.142 . 4 Afflux de ruissellement à l'émissaire si t<sub>p</sub> < t<sub>r</sub> à intensité critique de pluie  $\hat{h}$  constante**

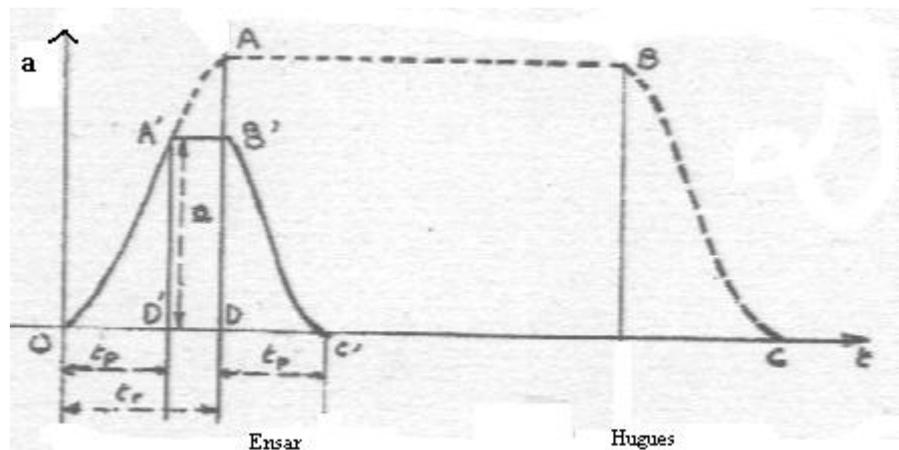
Dans le diagramme infra la courbe OABC utilisée supra est alors remplacée par le diagramme OA'B'C', l'ordonnée du palier devient a = f(t<sub>p</sub>,  $\hat{h}$ )

On sait que l'aire OA' D' est égale à K Sh, K =  $\frac{\text{volume d'eau reçu à l'émissaire pendant le temps } t_p}{\text{volume total de pluie tombée sur S}}$

mais K Sh = K S  $\hat{h} t_p$

d'où K S  $\hat{h} t_p = \varphi(t_p, \hat{h})$

et  $K = \frac{\varphi(t_p, \hat{h})}{S \hat{h} t_p}$



● Pour une pluie d'intensité déterminée, l'afflux de ruissellement à l'émissaire reste proportionnelle à la durée de la pluie, si cette dernière est inférieure au temps de ruissellement.

**142.5 Retour au débit initial, autre coefficient de ruissellement**

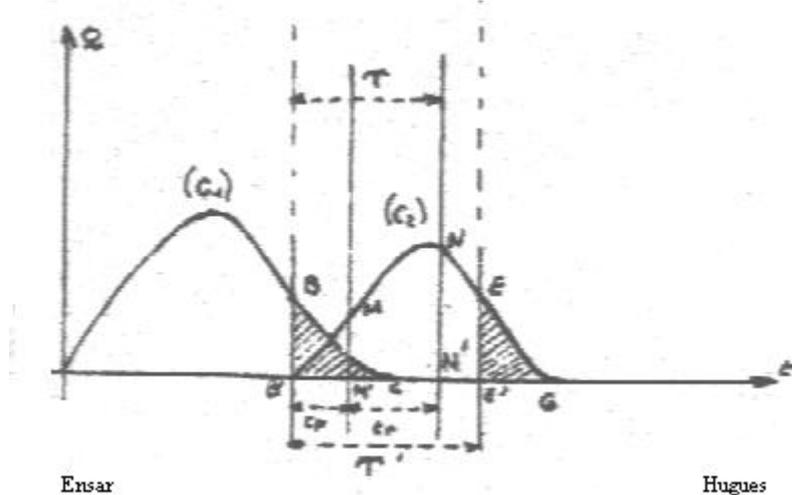
Au § 142.1 supra, il a été défini les coefficients de ruissellement  $K_1$  et  $K$  exprimant le rapport entre la pluie qui ruisselle et qui est évacuée par l'émissaire (pluie utile) et la pluie totale.  $K_1$  correspond au temps  $t_p + t_r$  et  $K$  au temps  $t_p$

Posons  $K_2 = \frac{\text{volume d'eau reçue à l'émissaire en amont de } \Sigma \text{ pendant le temps } T'}{\text{volume d'eau tombée sur } S}$

$T'$  = temps pour que le débit à travers  $\Sigma$  soit égal à celui observé à l'origine. Représentons dans le plan  $(t, Q)$  la variation du débit.  $Q$  dans  $\Sigma$ , en fonction du temps pour 2 pluies successives. (Voir courbes *infra*).

Si l'on tient pour négligeable le temps que met une particule d'eau qui arrive à l'émissaire pour atteindre  $\Sigma$ , la courbe de l'afflux à l'émissaire en  $f(t)$  se confond avec la courbe  $Q(t)$ .

Considérons les courbes  $C_1$  et  $C_2$  du débit dans  $\Sigma$  pour deux pluies successives  $P_1$  et  $P_2$ .



L'afflux total relatif à la pluie  $P_2$  est représenté par l'aire limitée par l'axe  $O t$  et la Courbe  $C_2$ .

L'afflux partiel pour le temps  $t_p$  est mesuré par l'aire  $B'MM'$  et l'afflux partiel pour temps  $T = t_p + t_r$  est mesuré par l'aire  $B'NN'$ .

Cf. graphique ci-contre

Mais les aires  $BB'C$  et  $E'EG$  sont égales, car elles représentent les afflux respectifs, pour les deux pluies, et pour la période où l'alimentation de l'émissaire est due exclusivement à l'apport de la nappe souterraine, elle-même tributaire de la pluie précédente.

Un tel écoulement ne dépend que de l'état initial pour un même bassin et les états initiaux restent les mêmes pour  $C_1$  et  $C_2$ . Ces remarques permettent de déterminer les coefficients de ruissellement  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K$  qui dépendent ainsi, de la superficie du bassin hydrologique, de sa configuration topographique, de sa structure pédo-geologique, des terrains et du climat, lequel conditionne l'évapo-transpiration.

Ces déterminations doivent être effectuées dans chaque cas.

● Par exemple à Ferrare, pour déterminer  $K_2$  Pasini a comparé la pluviométrie aux volumes d'eau élevés entre deux pluies consécutives par les stations de pompage. ensuite il a estimé que  $K_1 = 0,9 K_2$  (aubout de 5 jours) et il a trouvé des chiffres variant pour  $K_1$  de 1 en février à 0,16 au mois d'août, module mensuel sur une durée de 10 ans.

#### 142. 6 Calcul des coefficients de ruissellement et tarissement d'un cours d'eau

Si l'on prend pour origine des temps, le début de la pluie  $P_i$ ,

l'afflux dans  $\Sigma$  imputable à la pluie  $P_i$  est pour la durée de  $P_i$  :  $\int_0^{t_p} Q_i dt$

l'afflux pour la durée totale du ruissellement  $T = t_p + t_r$  vaut :  $\int_0^T Q_i dt$

Il s'ensuit que les coefficients de ruissellement (écoulement) deviennent

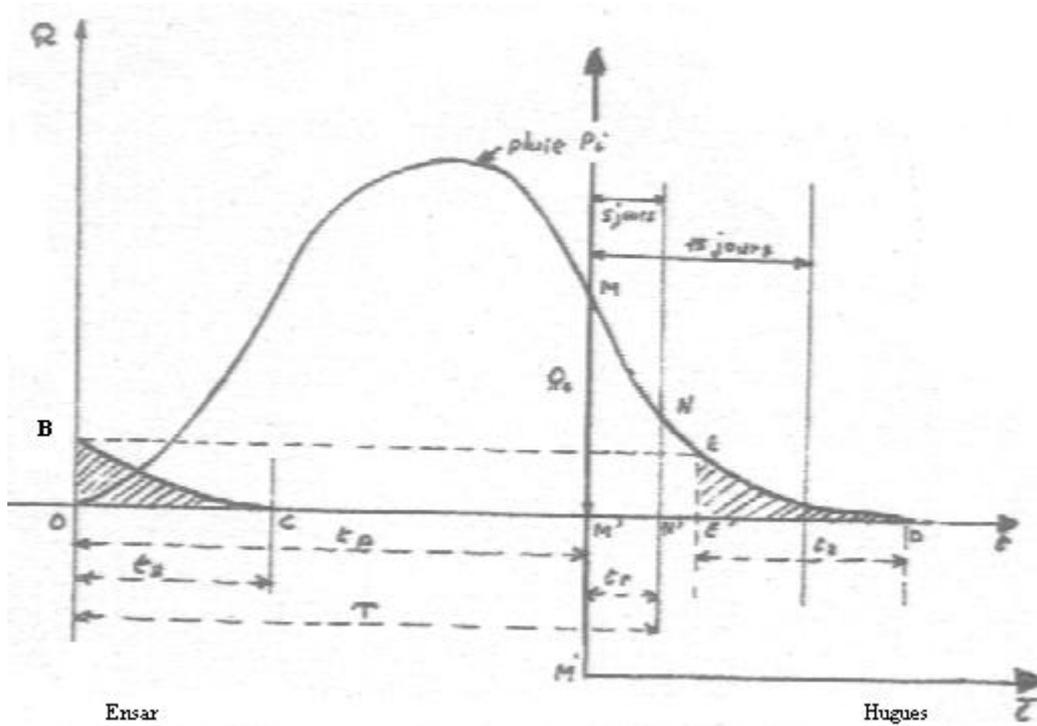
$$K = \frac{\int_0^{t_p} Q_i dt}{S h} \quad \text{et} \quad K_1 = \frac{\int_0^T Q_i dt}{S h}$$

Quant à l'afflux dans  $\Sigma$ , pour la période comprise entre le début de la pluie et le retour à l'état initial, il atteindra la valeur  $\int_0^{\infty} Q_i dt$

car les aires O B C et E E' D sont égales et en conséquence le coefficient correspondant s'écrit

$$K_2 = \frac{\int_0^{\infty} Q_i dt}{S h}$$

Voir graphique *infra* où B se situe sur la courbe de débit liée à la pluie précédant celle partant en O



Si l'on prend comme nouvelle origine des temps l'époque  $t_p$  marquant la fin de  $P_i$  et si l'on désigne par  $\tau$  le temps ainsi défini, en supposant le débit décroissant (tarissement)  $\frac{dQ}{dt} < 0$  plus le temps de sécheresse s'allonge, plus le débit du cours d'eau baisse

Pour la nouvelle phase de l'écoulement marquée par la fin de la pluie, le débit étant décroissant, on peut le représenter en posant  $\alpha$  : coefficient de tarissement, par la Loi de Maillet:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha \tau} \quad (1)$$

Cependant une telle formule n'est strictement applicable qu'à partir de la fin du ruissellement ainsi qu'il en résulte de la théorie des sources de Boussinesq. Son emploi pour la période antérieure comprise entre la fin de la pluie et la cessation du ruissellement constitue une extrapolation pour cette période valable pour le cas où l'apport par ruissellement serait négligeable comparativement à l'apport souterrain.

$$\text{afflux reçu pendant } T' - \text{afflux reçu pendant } T = \int_0^{\infty} Q_i d\tau - \int_0^T Q_i d\tau$$

$$\text{Remplaçons } Q_i \text{ par sa valeur dans (1)} = \int_0^{\infty} Q_0 \cdot e^{-\alpha \tau} d\tau - \int_0^T Q_0 \cdot e^{-\alpha \tau} d\tau$$

$$\text{Le graphique montre } (T=t_r) (K_2 - K_1) S h = Q_0 \int_{t_r}^{\infty} e^{-\alpha \tau} d\tau \quad (2)$$

$$\text{afflux reçu pendant } T' - \text{afflux reçu pendant } T = \frac{Q_0}{\alpha} e^{-\alpha t_r} \quad \text{par intégration de (2) } T=t_r$$

$\alpha$

- A Ferrare, Pasini constata qu'à compter de la fin de  $P_i$ , 5 jours étaient nécessaires pour que cessent le ruissellement que l'afflux  $K_1 S h$  était égal à  $0,9 K_2 S h$  et qu'enfin 15 jours après la

cessation de  $P_i$ , le débit dans  $\Sigma$  atteignait le quart de celui observé à la fin de la période de ruissellement, d'où trois équations :

$$K_1 = 0,9 K_2 \quad (K_2 - K_1) = \frac{Q_0}{\alpha} e^{-5\alpha} \quad Q_0 e^{-5\alpha} = 4 Q_0 e^{-15\alpha}$$

l'on peut en déduire  $\alpha$  puis de là .....  $K$ ,  $K_1$  et  $K_2$  par intégration<sup>42</sup>

## 2 Erosion



### 21 . Définition

L'érosion<sup>43</sup> peut se définir comme l'usure de la surface de la terre par l'action d'éléments divers tels que le vent (érosion éolienne) ou l'eau (érosion hydraulique et glaciaire) ou l'action humaine (déboisement) ou animale (chèvre) sans oublier le gel.

### 22 . Historique

L'érosion a sans doute existé aux temps préhistoriques ( grottes de Tessali au Sahara). Au cours de la période historique l'on a pu en suivre les effets dévastateurs dans les pays du Levant.

Dans l'histoire contemporaine, l'alarme a été donnée par les Etats-Unis qui créèrent dès 1935 "Le service de conservation des sols".

En France, dans les Alpes maritimes, le col de la Bonnette (2 800 m d'altitude) montre l'aspect d'une steppe impropre à la culture, la montagne se délitant par érosion en direction de Saint-Etienne-de-Tinée.



Cf. photographie ci-contre

Si l'on entendait provoquer le **recul de la faim** dans le monde, il faudrait d'abord provoquer celui de l'érosion, puisqu'elle empêche la production agricole, comme l'indique le tableau infra.

facteurs favorisant la production	facteurs défavorisant la production
structure de sol équilibré (grains - pâte - trous)	la pluie élimine $Ca^{++}$ et colloïdes
alvéoles avec air et eau	culture intensive de l'homme

Pour conserver le sol, l'agriculteur devrait donc agir de façon restitutive.

### 23. Mécanisme de l'érosion hydraulique au niveau de la parcelle.

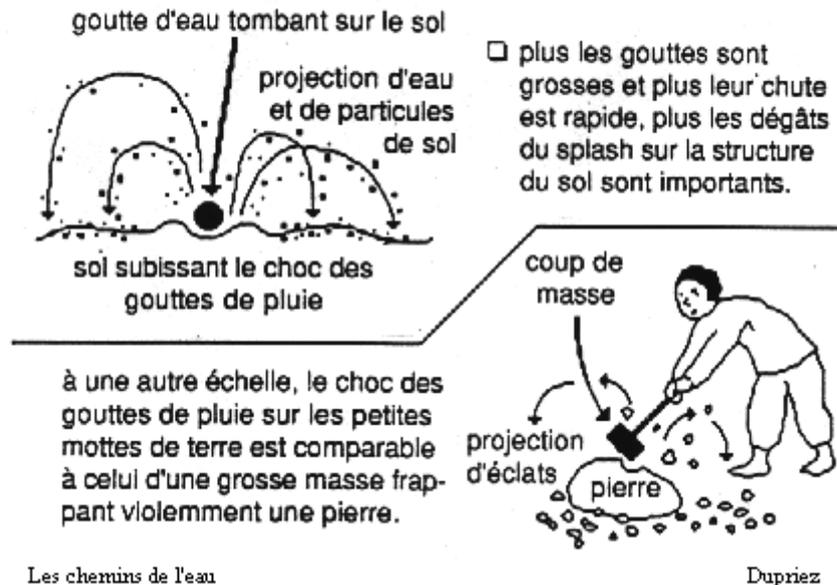
<sup>42</sup> En se souvenant que  $\int_0^\infty Q_0 \cdot e^{-\alpha \tau} d\tau = Q_0 [-\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha \tau}]_0^\infty = Q_0 \cdot \frac{1}{\alpha} (0 - (-1)) = \frac{Q_0}{\alpha}$

<sup>43</sup> Du latin erodere : ronger

### 23.1 Action de la chute de l'eau :

L'eau de pluie peut, OU s'arrêter après un choc mou, surtout si l'incidence s'éloigne de la normale à la sur. ... après ... elette entraînant la terre.

Cf. figure ir ...



Une pluie orageuse tombant à 10 m/seconde entraînera la terre ; le sol perd alors son aspect motteux pour prendre celui, compact, d'un béton " couche de battance "

Les sols riches en complexe argilo-humique ou couverts de végétation résistent mieux à ce phénomène.

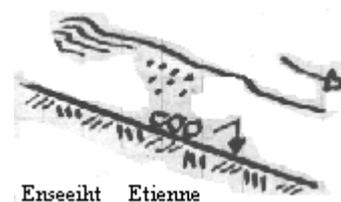
### 23.2 Types de transport de la terre :

Si le terrain présente de la pente, les gouttelettes rebondissant davantage vers le bas, vont transporter de la terre de deux façons.

#### 232.1 Si les éléments offrent une faible granulométrie

Il se produira une **suspension** de grains d'argile et de sable.

Cf. schéma ci-contre



#### 232.2 Si les éléments présentent un poids plus lourd

Les grains tombés au fond, puis les grains vont sauter ; on appelle ce phénomène : la saltation. Cf. schéma supra puis le **charriage** assurera alors le transport sur le fond

Sachant que l'érosion peut décaper jusqu'à  $10\ 000^3$  de terre/km<sup>2</sup>/an, l'émissaire exutoire d'un bassin-versant véhicule alors un débit solide.

### 23.3 Caractères des sols érodés :

Par ordre de gravité croissante, ils présentent les caractères suivants :

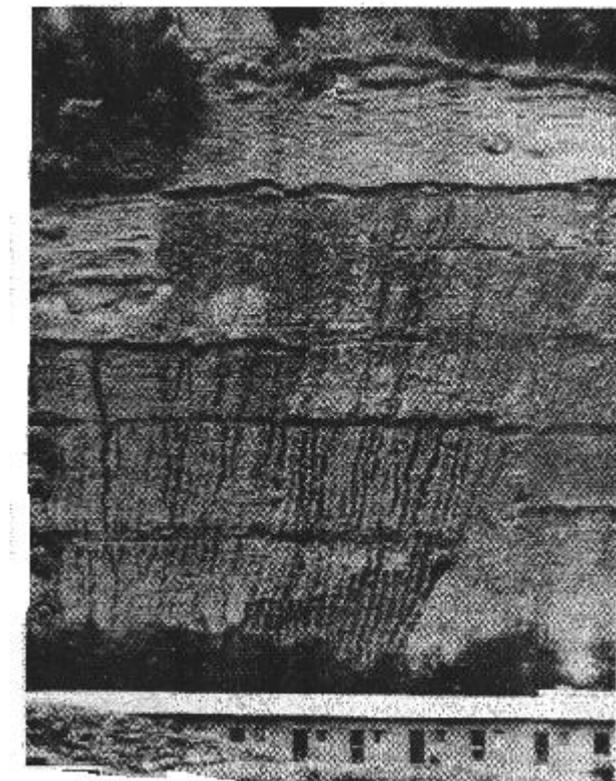
#### 233.1 Erosion en couches :

L'on observe des taches claires sur les zones pentues dues au décapage de la couche supérieure plus foncée à cause de l'humus, ainsi que des blocs de pierre que leur poids a protégés de l'entraînement.

#### 233. 2 Erosion en rigoles :

L'eau des rigoles se rassemble en flux de plus en plus importants. Les rigoles créées ressemblent à de longs coups de griffe qui auraient été infligés au terrain par un animal géant .

Ces rigoles en griffes s'observent au delà du bâtiment en arrière plan de la photographie ci-contre



Les chemins de l'eau

Dupriez

### 233.3 Erosion par ravinement

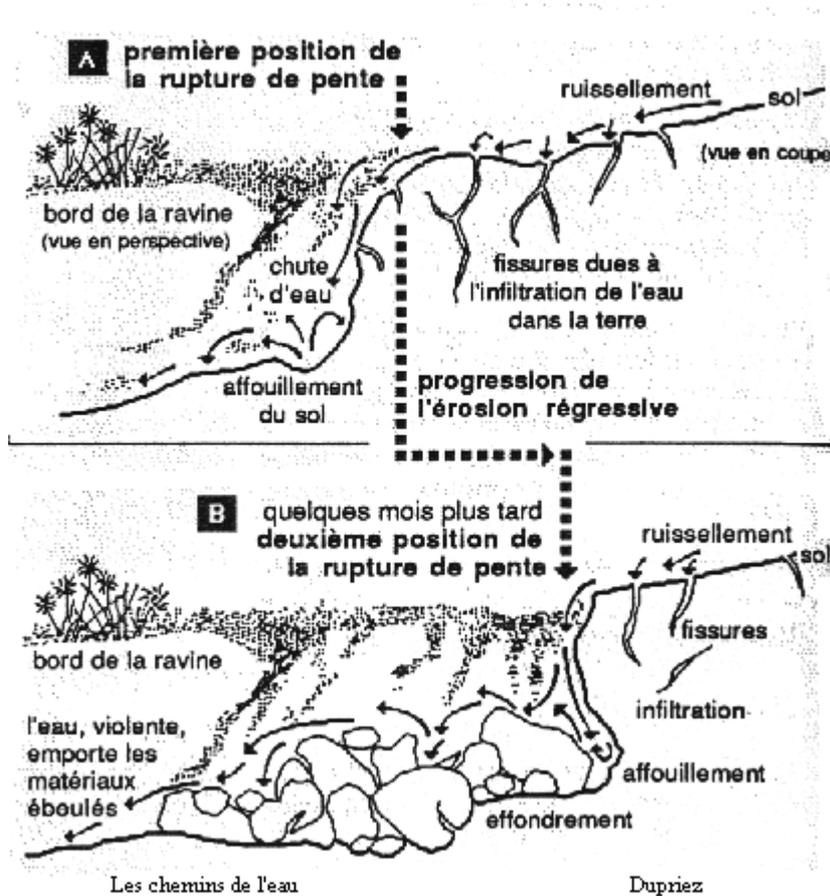
Le terrain prend alors l'aspect bouleversé d'un terrain de montagne en miniature. L'on se trouve devant le phénomène **d'érosion régressive**.

- L'eau qui tombe à l'endroit de la cassure acquiert vitesse et force. Il en résulte un affouillement de la base de la cassure et l'eau entraîne ensuite avec elle divers matériaux du sol.

• A un moment donné, la cavité formée à la base de la cassure devient telle que le sol s'effondre immédiatement après l'effondrement, l'eau emporte la terre effondrée et poursuit son travail de sape.

• L'effondrement de la terre dans le lit de la ravine est aussi provoqué par les infiltrations juste en amont de la cassure. Le sol fissuré par ces infiltrations est devenu friable et s'effondre plus facilement qu'un sol compact.

cf. figure infra



Une telle situation devient alors délicate à récupérer.

Dans les Alpes maritimes, pour la région proche du col de la Bonnette citée supra, une reforestation s'avéra nécessaire avec des pins corses.

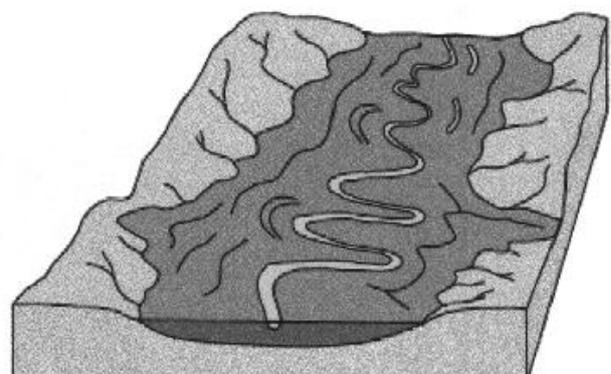
## 24. Mécanisme de l'érosion hydraulique à l'échelle terrestre :

### 24.1 Energie potamique<sup>44</sup>

Un cours d'eau constitue un système ouvert avec **des entrées et des sorties** d'énergie et de matière. De là on peut déduire différentes formes de rivière qui constituent des ajustements du cours d'eau agissant comme un fluide mobile sur le solide érodable que constitue son lit.

### 24.2 Résultat de cette dissipation d'énergie

Le cours d'eau aplanit ses reliefs et diminue son gradient de pente, il érode latéralement, élargissant la vallée et créant par ses dépôts une plaine d'inondation. Cette dernière se construit par l'apport constant de



<sup>44</sup>ο ποταμός, ον, : le fleuve

sédiments issus de l'érosion en amont et par épandage dans la vallée de ces sédiments durant les débordements dus aux crues.

Cf. croquis ci-contre

Le stade de la vieillesse est atteint, lorsque la vallée est beaucoup plus large que les plus larges méandres du cours d'eau ; à noter que les tributaires du cours d'eau principal contribuent eux aussi à aplanir les reliefs adjacents.

### 243.3 Mécanisme de l'érosion par la glace à l'échelle terrestre

Si les eaux de ruissellement constituent un agent d'érosion très important, l'eau à l'état condensé de la matière donc sous sa forme solide, la glace, participe au modelage des surfaces continentales.

#### 243.1 Morphologie d'un glacier

Elle a été décrite supra ( § 36 cours aliment3 ). Il peut paraître difficile de concevoir que la glace s'écoule, mais, avec le facteur temps, la glace se comporte comme un matériau plastique ou, tout au moins semi-plastique. Le poids de la matière en zone d'accumulation initie et conduit l'écoulement de la glace, en poussant sur toute la masse qui s'écoule. Ledit écoulement reste lent : 180 m/an pour les plus grands glaciers ; 90 m/an pour les plus petits.

Le front glaciaire reste stable sauf s'il se produit une augmentation ou une diminution des températures, le front retraite ou s'avance.

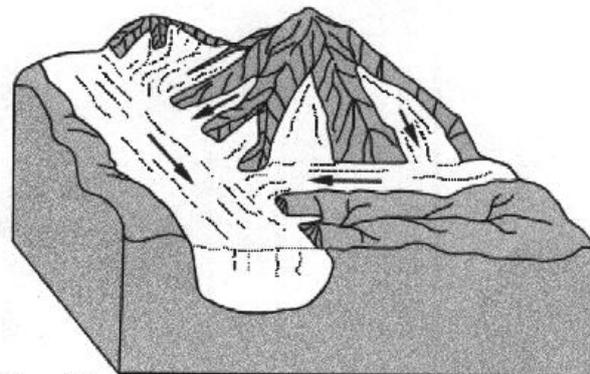
Sur le glacier et au front du glacier, la fonte des glaces produit des eaux de circulation qui distribuent les sédiments piégés dans le glacier et forment, à l'avant du glacier, une plaine d'épandage.

#### 243.2 Rabotage par la glace

L'épaisseur d'un glacier se mesure généralement en plusieurs dizaines, parfois même jusqu'à quelques centaines de mètres. Cette masse importante agit sur la roche comme un buteur. Le creusement s'effectue progressivement à mesure de l'écoulement sur de longues périodes de temps.

Progressivement, vont se creuser des vallées qui peuvent atteindre des centaines de mètres de profondeur. Lesdites vallées montreront un profil bien caractéristique en U.

Cf. croquis ci-contre.

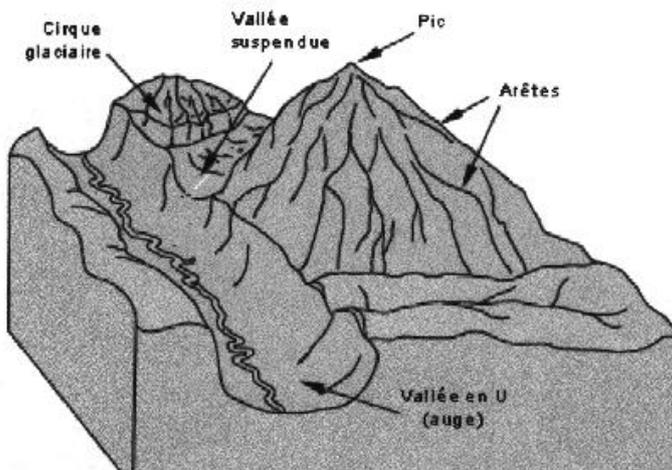


Université Laval

Canada

#### 243.3 Résultat : paysage post-glaciaire

Après la fonte des glaciers, l'on découvrira un paysage de cirques glaciaires (anciennes zones d'accumulation de la glace), de vallées dites en U (auge glaciaire).



Université Laval

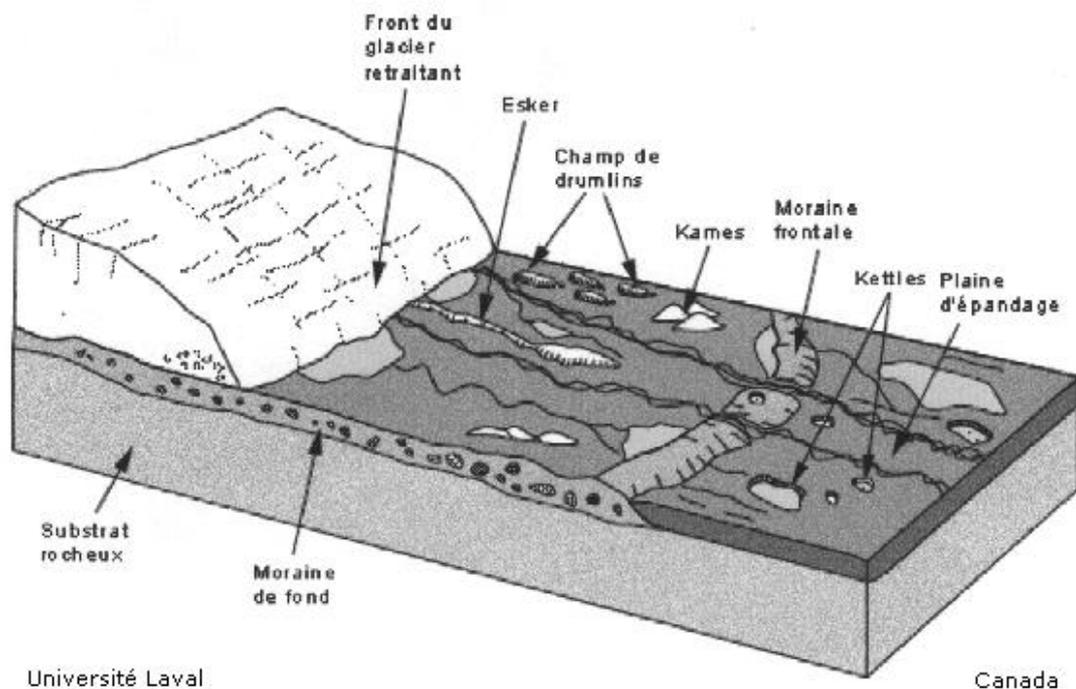
Canada

Il montrera aussi des pics et des arêtes délimitant des vallées suspendues résultant du creusement par des glaciers plus petits venant se fondre dans le principal.

Cf. croquis ci-contre

Le glacier arrache des matériaux au substrat rocheux ; tout ce matériel sédimentaire produit directement par l'action de rabotage de la glace sur la roche, porte le nom de moraine. Les eaux de fonte du glacier redistribuent les matériaux glaciaires sur une plaine d'épandage formant un cortège de dépôts appelés fluvio-glaciaires. Le retrait du glacier laisse sur place tous ces dépôts caractérisant le paysage glaciaire

voir croquis *infra*



## 25. Mécanisme de l'érosion hydraulique au niveau du bassin-versant :

### 25.1 Profil d'équilibre de la rivière drainant le bassin-versant

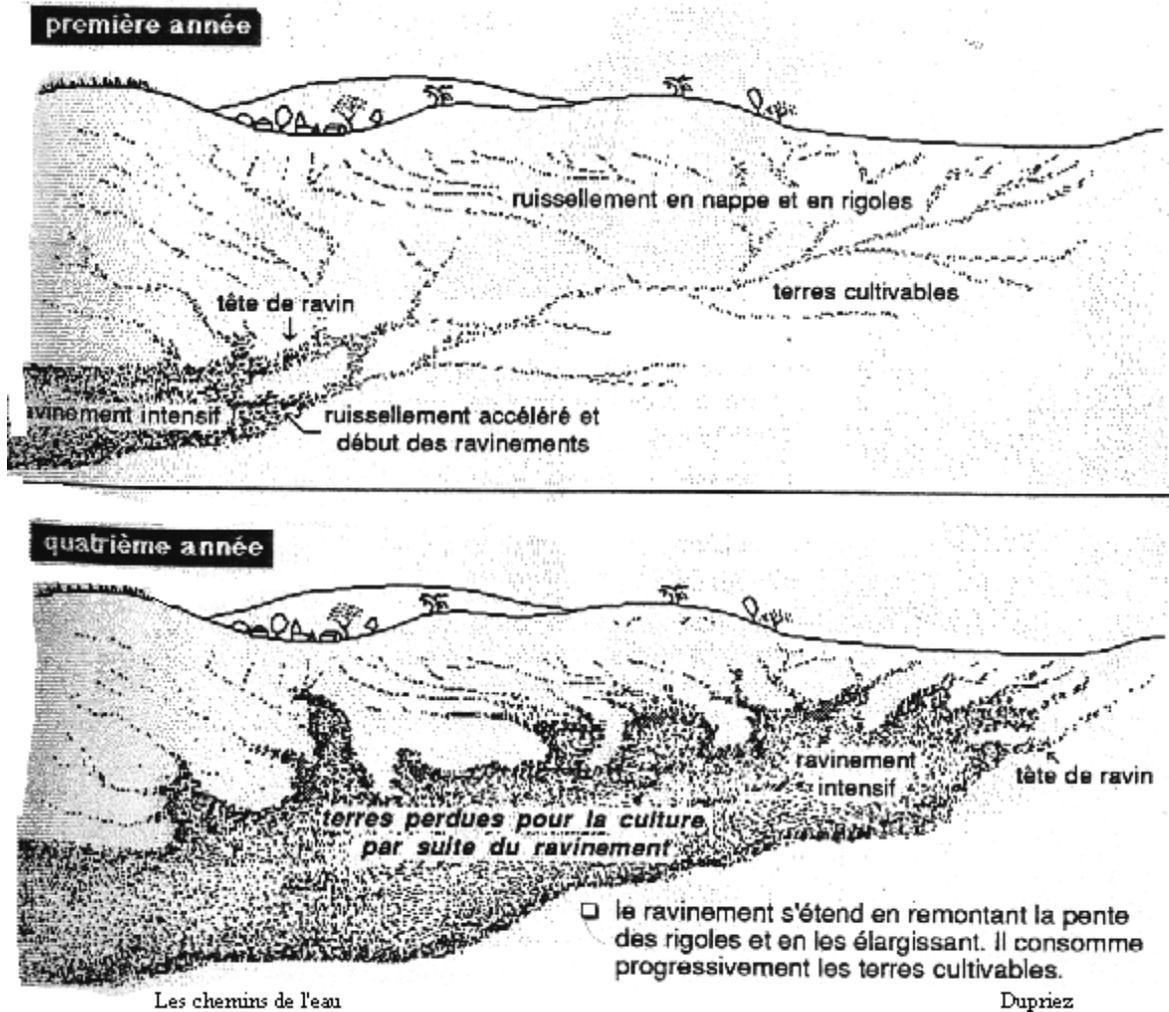
Le cours d'eau tend vers son profil d'équilibre par ajustement à un niveau de base, défini par le niveau d'eau du milieu aquatique (fleuve, mer, lac) où il se jette.

Ceci se répercute sur les propres tributaires du cours d'eau, c'est-à-dire, les ruisseaux et les rigoles.

Dans le dessein d'atteindre son profil d'équilibre il se produira à l'amont des ravinements entraînant la redoutable érosion régressive et vers l'aval dans le cours d'eau une érosion avec méandres, érosion des rives, dépôts de bancs de sable ....

### 25.2 Erosion dite régressive ou de ravinement

Dans un bassin-versant, l'érosion régressive provoque des dégâts gigantesques, elle entraîne le prolongement des ravines vers les crêtes et leur élargissement



cf. croquis supra



gorges du Tarn

Boulac

### 25.3 Erosion des cours d'eau en milieu karstique

La rivière s'enfonce en creusant des gorges dans le **calcaire** et les marnes par exemple :

les canyons du Colorado aux Etats-Unis, les gorges du Tarn en France.

cf. croquis ci contre

la hauteur des falaises, 800 mètres de dénivelée, permet même l'usage du delta plane

## 25.4 Erosion dans les cours d'eau méandriques

Si la rivière s'écoule dans des sols argileux en général, elle serpente selon des méandres .

### 254.1 Lois de Fargue sur la formation des méandres :

Examinons comment l'émissaire du bassin-versant érode le talweg

Un cours rectiligne ne reste pas stable ; le courant divaguera, entraînant la création de méandres. Un fleuve constitue une succession de courbes et de contre-courbes.

#### ● Loi de l'écart :

la mouille se trouve décalée d'un quart vers l'aval par rapport au sommet de la courbe ; car dans un coude, les courants de surface plongent et le maximum ne se place pas au sommet ,

le seuil est décalé d'un quart de courbe vers l'amont par rapport à l'inflexion.

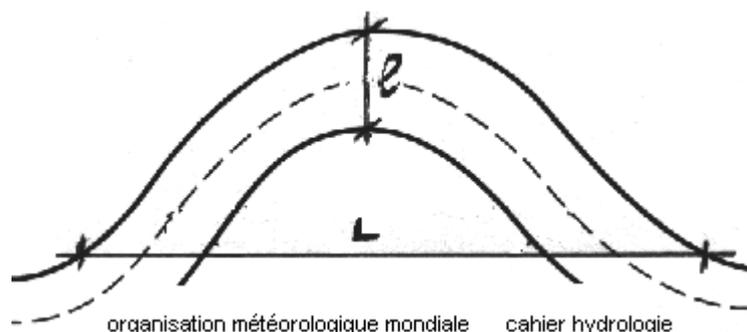
. cf. croquis ci-contre



#### ● Loi du développement :

Pour un méandre stable, la longueur égale 8 fois la largeur du cours d'eau  $L = 8l$

Cf .croquis ci-contre



#### ● Loi de la profondeur de la mouille :

Il existe une relation entre la profondeur (h) de la mouille et la courbure (c) du méandre pour un débit donné , la mouille sera d'autant plus profonde, pour un débit donné , que la courbure au sommet sera plus prononcée.

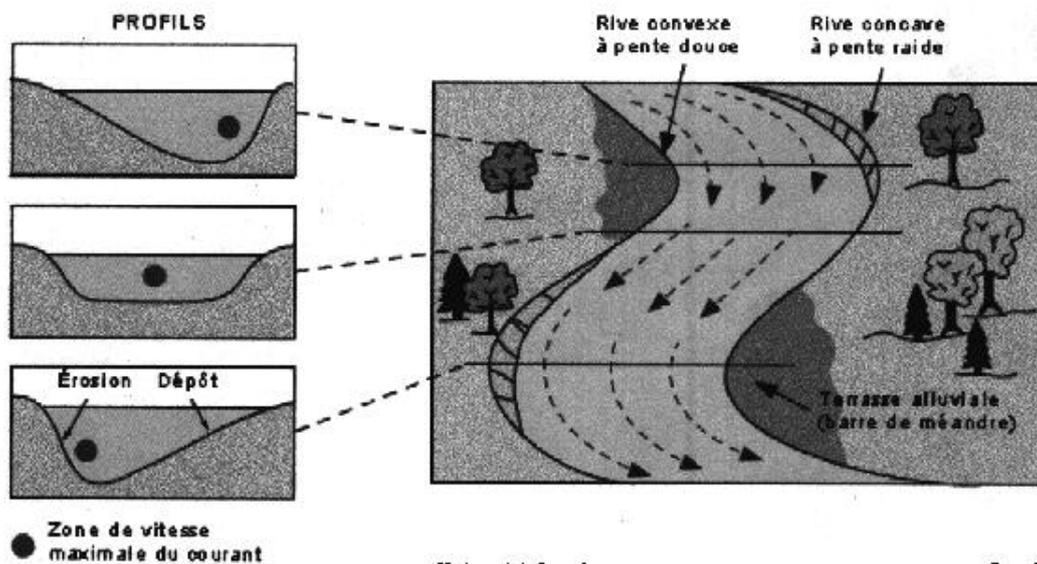
Dans l'intérêt de la profondeur (h) ,tant maximum que moyenne la courbe ne doit pas dessiner une forme de courbure (c) trop courbe ou trop développée

$$\frac{dc}{ds} = a \frac{dh}{ds} \quad \text{la courbure est proportionnelle à la profondeur}$$

### 254.2 Caractère de l'érosion dans un cours d'eau méandrique :

Dans un méandre, l'érosion se fait sur la rive concave à pente raide, là où la vitesse du courant est la plus grande, alors que le dépôt se fait sur la rive convexe, là où la vitesse du courant est plus faible, formant une terrasse alluviale (ou barre de méandre).

Le couple " érosion - dépôt " entraîne une migration latérale du méandre causant un élargissement de la vallée. Cf. schéma *infra*.

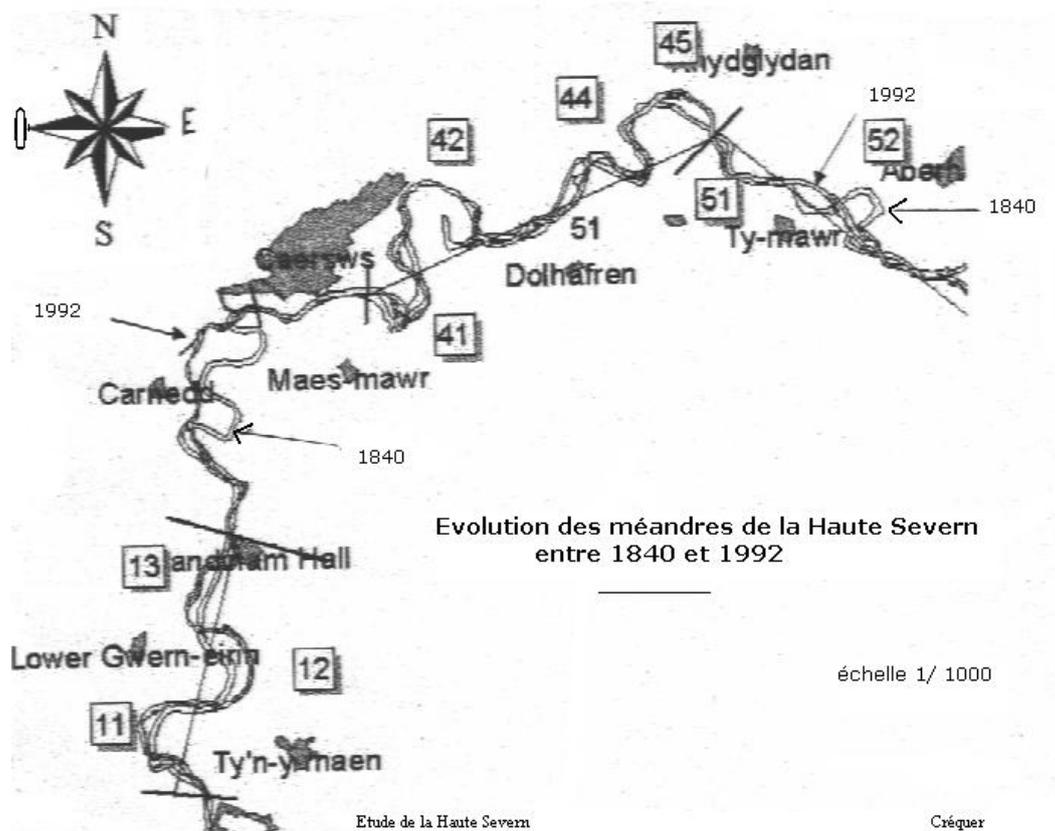


Université Laval

Canada

### 254.3 Exemple des méandres de la Haute Severn

L'étude de la sinuosité de la haute Severn entre 1840 et 1992 réalisée pour le compte de l'Université d'Aberyswyth au Pays de Galles, montre bien l'évolution méandrique et partant l'érosion lors de cette période  
Cf. plan *infra*



### 3 lame d'eau précipitée sur une surface

#### 31 Définitions

- **31.1 lame d'eau écoulée**

Volume écoulé à l'exutoire d'un bassin versant divisé par la surface du bassin.

Volume écoulé à l'exutoire OU  $I = \frac{V}{S}$  (1)  
surface du bassin

Il s'agit donc pour le numérateur du volume total débité annuellement par la rivière au point considéré; engendré par une hauteur de pluie uniformément répartie sur le bassin versant. (Réménieras op. cit.)

Si l'on compte la surface en km<sup>2</sup> et la hauteur en mm, il vient :

$$I = \text{lame}_{\text{mm}} = \frac{Q \cdot m^3 / s \cdot 365 \cdot 86,400 \cdot 10^{-345}}{S \text{ km}^2}$$

- **31.2 Précipitations annuelles**

h en mm, hauteur d'eau moyenne annuelle en un point.

- **31.3 Coefficient d'écoulement**

Rapport entre la lame d'eau écoulée et les précipitations annuelles mais  $K = \frac{V}{Sh(2)}$   
 $C = I/h$

<sup>45</sup> 86 400 secondes en 24 heures

K = Cen fonction de (1) et (2)

### 31.4 Déficit d'écoulement

Différence entre les précipitations annuelles et la lame d'eau

$$D = h - l$$

### 31.5 Débit spécifique :

Rapport entre le débit moyen annuel et la surface du bassin versant :

$$Q/S \quad \text{il s'exprime en général en litre/seconde/km}^2$$

## 32 Lame d'eau sur une parcelle

Soit un "jardin suspendu", d'une superficie de  $400 \text{ m}^2$  placé en toiture et couvert d'herbe :  
Sachant que la pluie comptée selon une répartition annuelle sur une période de 50 ans, donne un module<sup>46</sup> annuel de 900 mm, quelle quantité d'eau devra-t-on évacuer par les chenaux ?

### Le volume d'eau annuel reçu

$$400 \cdot 0,9 = 360 \text{ m}^3$$

soit environ  $1 \text{ m}^3$  par jour, si l'on admet que la capacité d'infiltration de la terre assure un débit permanent et constant d'écoulement.

### Volume d'eau absorbée par l'herbe

Cette prairie superficielle absorbe de l'eau pour fabriquer la matière des plantes qui la constituent.  
Ramenée à l'hectare, la production en unités fourragères s'élève à 8 000 environ, soit 16 000 kg de foin à 20 % d'humidité donc dans lesquels on trouve :

$$16\,000 - 3\,200 = 12\,800 \text{ kg de matière sèche}$$

Pour obtenir 1 kg de matière sèche il faut fournir  $0,350 \text{ m}^3$  d'eau

Dans ce cas, il en a fallu  $12\,800 \cdot 0,350 = 4\,450 \text{ m}^3$  d'eau, ceci pour un hectare soit  $10\,000 \text{ m}^2$

pour les  $400 \text{ m}^2$ , il faut  $\frac{400 \cdot 4\,450}{10\,000} = 180 \text{ m}^3$  d'eau

### Volume d'eau à écouler

Il reste  $360 - 180 = 180 \text{ m}^3/\text{an}$

Si l'on possède 6 chenaux, cela représente :

$$180 / 6 = 30 \text{ m}^3/\text{an} \quad \text{ou} \quad 85 \text{ l/jour}$$

### Récapitulation :

précipitations (h) ..... 900 mm donnant un volume brut de... $360 \text{ m}^3$

lame d'eau (l) ..... 450 mm représentant un volume d'eau ruisselée de  $180 \text{ m}^3$

déficit d'écoulement (h-l) ... 450 mm

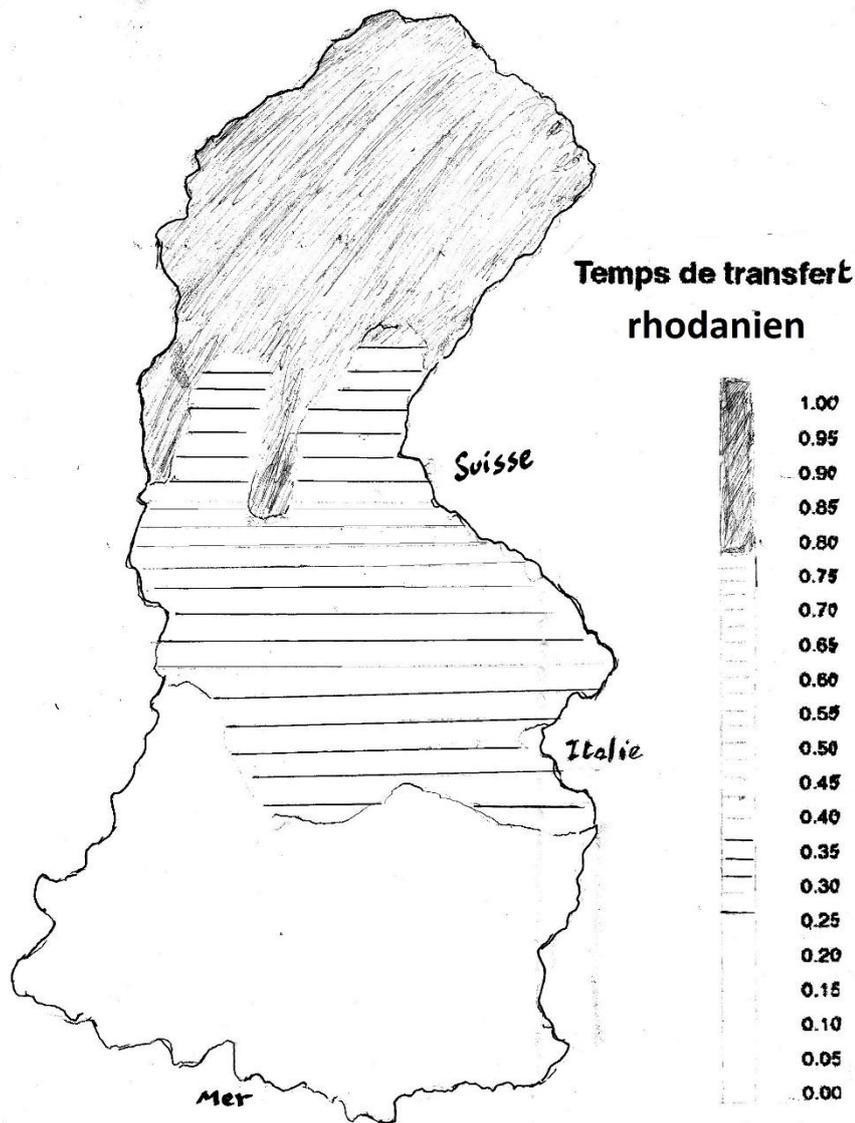
coefficient d'écoulement ( $l/h$ ) =  $0,5$

## 33 Lame d'eau sur un bassin versant

### 33.1 Temps de transfert de la lame d'eau du bassin rhodanien. Voir carte *infra*

---

<sup>46</sup> Module de pluviométrie: hauteur d'eau moyenne annuelle en un point, évaluée par la moyenne des hauteurs d'eau moyennes annuelles mesurées sur une longue période



Le temps de transfert de la lame d'eau jusqu'à l'embouchure du fleuve, estimé aux différents endroits du bassin du Rhône. Les temps sont normés par rapport au temps de concentration du bassin, temps le plus long (gris) mis par une goutte d'eau pour rejoindre l'embouchure est égale à ... 6 jours

Depuis Lyon la lame met environ 3 jours (1 m/s ou 3,6 km/h) pour rejoindre la Méditerranée

### 33.2 Application des formules du déficit d'écoulement

Le déficit d'écoulement ( $h - l$ ) différence entre les précipitations annuelles et la lame d'eau, peut être calculé par des formules ( cela sert à vérifier les résultats des mesures ) ou bien à partir des hyétogrammes et hydrogrammes <sup>47</sup>.

#### 332.1 Abaque de Wundt pour le bassin versant du Jabron

Il est appliqué, selon Monsieur Pardé c'est-à-dire en réduisant de 30 mm le déficit d'écoulement tel qu'il résulte de l'application stricte de l'abaque (écoulement restant plus important par suite de la concentration des pluies en saison froide).

<sup>47</sup> το ύδωρ ,υδάτος = l' eau η γραμμή = la ligne

Quant aux températures, elles sont considérées comme le facteur de l'écoulement le moins important dans l'espace, du moins pour les moyennes. Les observations sur Montélimar donnent 12°89. Il semble qu'une valeur de 12° ne soit pas très éloignée de la réalité dans le haut bassin. En effet, il ressort que les températures sont plus élevées en montagne en été (le mistral en plaine donne lieu ici à un phénomène de foehn), mais inférieures pour les autres mois.

L'on obtiendrait :  
pluviosité : 1 037 mm  
lame d'eau : 415 mm  
déficit : 622 mm  
coef. écoulement : 0,43

sur une superficie de 79 km<sup>2</sup> avec un module annuel sur 17 ans de 1,03 m<sup>3</sup>/s on obtient  
débit spécifique  $\frac{1\ 030}{79} = 13\ \text{l/s/km}^2$

module annuel de débit : débit moyen annuel en un point d'un cours d'eau évalué par la moyenne des débits moyens annuels mesurés sur une longue période

### 332.2 Formule de Coutagne pour le bassin versant du Jabron

Avec  $D = 210 + 30 T$  où D est le déficit d'écoulement  
T la température annuelle moyenne

on obtient  $D = 210 + 360 = 570\ \text{mm}$

L'on obtiendrait  
pluviosité : 1 015 mm  
lame d'eau : 445 mm  
déficit : 570mm  
coef. écoulement : 0,43

Avec un module annuel sur 17 ans de 1,11 m<sup>3</sup>/s sur 79 km<sup>2</sup>  
débit spécifique :  $\frac{1\ 113}{79} = 14\ \text{l/s/km}^2$

### 332.3 Formule de Turc pour le bassin versant du Jabron

$$D = \frac{P}{(0,9 + \frac{P^2}{L^2})^{1/2}} \quad L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

P : module annuel pluie sur 17 ans

T : température moyenne annuelle sur 17 ans

On obtient pour un module de pluie de 1015 mm

une lame d'eau de 439 mm

donc un déficit de 576 mm

et un coefficient d'écoulement de 0,43 (439/1015)

ainsi qu'un débit spécifique de 9,76 l/s/km<sup>2</sup> (830/85)

## 33.3 Utilisation des mesures "in situ"

Les mesures de débit s'effectuent en général par un limnigraphe<sup>48</sup>

### 333.1 Corbières et Haut-Gard

En '98 il a été mesuré les pluviométries et les lames d'eau correspondantes dans les Corbières et le Haut Gard proche du mont Aigoual<sup>49</sup>

région	Pluviosités h	lame d'eau écoulée l	Coefficient h/l
Corbières	380 mm	40 mm	0,105
Haut Gard	1 400 mm	660 mm	0,47

<sup>48</sup>h λίμνη l'étang γράφω écrire

<sup>49</sup> du latin aqua,ae : eau devenu en occitan aigue

Il a donc plu 3,5 fois plus dans le Haut Gard que dans les Corbières  
Mais dans le Haut-Gard, le sol a restitué 16 fois plus d'eau que celui des Corbières.  
Lors de cette année sèche, les bassins des Corbières ne laissent écouler qu'une infime partie des eaux reçues ( de l'ordre de 10 % ).

### 333.2 L'Orb

En '98, des mesures furent effectuées sur l'Orb à Béziers ; elles indiquèrent :

Pluviosité h	575 mm	
lame d'eau écoulée l	345 mm	(module de débit : 14,6 m <sup>3</sup> /s sur une surface S = 1 330 km <sup>2</sup> )
déficit D	230 mm	
coefficient écoulement C	0,60	(Ce coefficient d'écoulement indique une année sèche sur l'Orb)
débit spécifique	11 l/s/km <sup>2</sup>	( 14 600 / 1320)

### 333.3 Le Jabron à Souspierre

Données hydrotimétriques sur une période de 29 ans indiquant , cf. tableau infra

avec un module de pluie de	950 mm	
une lame d'eau écoulée de :	310 mm	( module de débit : 0,83 m <sup>3</sup> /s sur une surface de 85 km <sup>2</sup> )
correspondant à un déficit de	640 mm	
et un coefficient d'écoulement de	0,33	
ainsi qu'un débit spécifique	9,76 l/s/km <sup>2</sup>	( 830 / 85)

**Données hydrométriques (DIRENE de Valence) Q MNA=** débit moyen annuel le plus faible de fréquence quinquen.

Caractéristiques de la station V 4455010 (Bassin versant 85 km <sup>2</sup> )			
Estimations sur la période 1970 - 1999		Année 1997 / 1998	
<b>Crue décennale</b> (septembre à août)	<b>m<sup>3</sup>/s</b> <b>34</b> (entre 28 et 47)	<b>Crue maximale</b> (septembre à août)	
<b>Module</b> (septembre à août)	<b>m<sup>3</sup>/s</b> <b>0,83</b> (entre 0,69 et 1)	<b>Moyenne annuelle</b> (septembre à août)	
<b>Lame d'eau</b>	<b>mm</b>	<b>Hydraulicité %</b>	
		<b>Lame d'eau</b>	<b>mm</b>
<b>QMNA quinquennal</b> (janvier à décembre)	<b>m<sup>3</sup>/s</b> <b>0,14</b> (entre 0,12 et 0,16)	<b>QMNA</b> (janvier à décembre)	<b>m<sup>3</sup>/s</b> <b>0,2</b>
<b>Etiage quinquennal</b> (janvier à décembre)	<b>m<sup>3</sup>/s</b> <b>0,11</b> (entre 0,093 et 0,13)	<b>Etiage</b> (janvier à décembre)	<b>m<sup>3</sup>/s</b> <b>0,18</b>

## 4 Estimation du temps de concentration

### 1. 41 Intensité critique<sup>50</sup> des pluies

Rappelons que si la hauteur d'eau totale précipitée au cours de la pluie reste importante, il faut s'intéresser à la variation temporelle,  $i = dh/dt$  (intensité)

<sup>50</sup> Ou intensité retenue pour le calcul du projet d'assainissement

Admettons que l'on ait enregistré sur une **longue période** (20 ou 30 ans) les précipitations par un réseau de pluviographes.

Dans le registre des observations pluviométriques, on cherche la **précipitation maximale** observée en un jour, soit que la durée de la pluie ait été effectivement d'un jour, soit que le jour de pluviosité maximale s'insère dans une plus longue durée.

Soit un intervalle de n jours consécutifs pendant lequel il y a eu des précipitations pour tous les jours de l'intervalle

H étant la hauteur totale des précipitations pour cette période.

$$H = \int_0^n h dt$$

h : la hauteur journalière de pluie, fonction du jour intéressé.

**L'intensité de la pluie journalière maximale**  $i = H/n$

$$i = \frac{1}{n} \int_0^n h dt$$

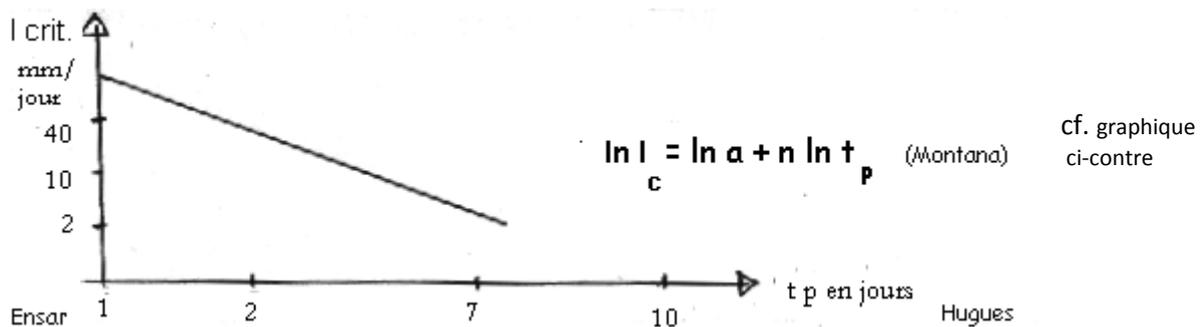
Avec  $di/dt < 0$  donc plus la durée est longue, plus l'intensité est faible.

Si l'on pose en abscisses, les durées  $t_p$  des précipitations en jours, et en ordonnées les intensités  $i$  de pluie, en mm/jour, on obtient une courbe représentant le cas critique, de la forme

$$i_c = a (t_p)^n \quad (\text{Montana})$$

que l'on peut représenter en coordonnées logarithmiques sous forme de droite :

$$\ln i_c = \ln a + n \ln t_p$$



#### 41.1 Graphique $i_c$ selon la pluviométrie de Lyon-Bron

Nous avons mis les relevés d'intensité de pluie en fonction de la durée, dans une équation de forme

$$i = a (t_p)^n$$

a et n étant des coefficients définissant l'hyperbole expérimentale, en intégrant cette dernière :

$$a = 13 \quad \text{et} \quad n = -0,80 \quad (\text{période de retour 10 ans})$$

$$\text{La courbe intensité-durée devient donc} \quad i = 13 t^{-0,80}$$

Avec t désignant le temps de concentration défini infra § 42

#### 41.2 Graphique de $i_c$ selon la pluviométrie de Montélimar-Ancône

De même, les coefficients définissant l'hyperbole expérimentale fondée sur des observations effectuées sur 10 ans sont obtenus par intégration et il vient

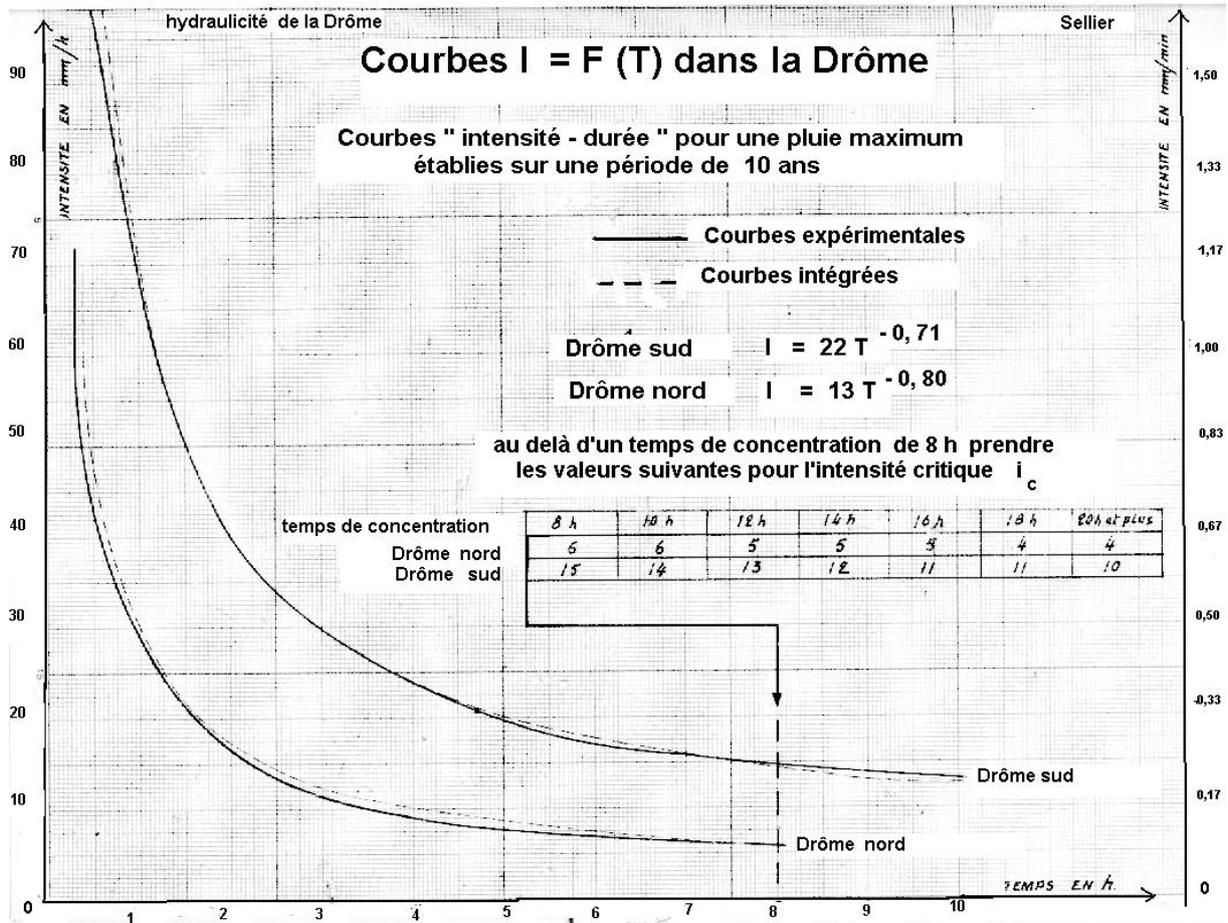
$$a = 22 \quad \text{et} \quad n = -0,71 \quad (\text{période de retour 10 ans})$$

La courbe intensité critique-durée devient alors

$$i = 22 t^{-0,71}$$

avec t représentant le temps de concentration défini infra § 42

Ces courbes figurent sur le graphique *infra*



## 42 Théories de calcul du débit de pointe - Temps de concentration

Pour mémoire, rappelons que les modèles (formules) employés reposent sur deux concepts principaux :

- **le temps de ruissellement** : précisant que le débit MAX à l'exutoire d'un bassin ne peut être observé que sous une averse de durée égale au temps de concentration défini comme "le plus long d'écoulement sur le bassin jusqu'à l'exutoire". Cela conduit à une surestimation des débits de pointe.
- **le temps de stockage** : supposant que le débit de pointe n'est observé à l'exutoire du bassin-versant, que si la durée de l'averse est égale au temps de remplissage du bassin-versant, c'est-à-dire lorsque la capacité de stockage du bassin-versant est satisfaite, cela donne lieu à une sous-estimation des débits de pointe.

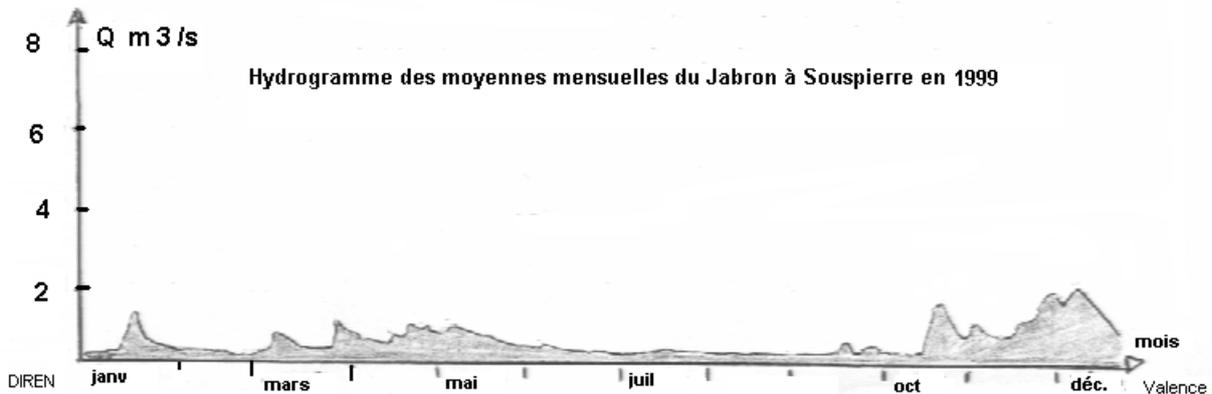
Tout en s'inspirant du temps de ruissellement, la formule de Caquot<sup>51</sup> intègre le temps de stockage et constitue un compromis pour obtenir le débit de pointe

## 43 Spécificité de la transformation pluie-débit

Un bassin-versant transforme une pluie spatialement distribuée en débit à l'exutoire  $i(t, x, y)$  : hyétogramme de pluie brute de probabilité (fréquence) de dépassement ( période de retour) donné

$Q(t)$  : hydrogramme (cf. graphique *infra*) (1)

<sup>51</sup> Physicien, capitaine d'aérostier en '14, il dessina les ballons d'observation de la guerre. En '41, il conçut la formule d'écoulement d'eaux pluviales. En '77, il dressa le projet d'usine marée-motrice du Mont St. Michel



Les formules (modèles) hydrologiques de ruissellement permettent de relier  $Q(t) \rightarrow i(t,x,y)$

### 43.1 Formule de Caquot : bassins-versants de surface < 2 km<sup>2</sup> (200 ha)

#### Remarque liminaire :

Il donna une méthode simplifiée et rapide pour déterminer le débit maximum correspondant à une averse de probabilité donnée. Cette méthode de la formule dite, superficielle, permet :

- de tenir compte de la capacité de stockage du sol
- d'aboutir à une formule finale ne contenant que trois paramètres

I : pente moyenne du bassin-versant  
C : coefficient d'écoulement ou de ruissellement  
A : superficie du bassin-versant

"L'équation des volumes" servant à l'établissement de la formule représente :

- pour son premier terme, le volume apporté par l'averse de probabilité décennale :  
 $1/6 \alpha \text{ H.A.C.}$  (volume d'eau net)  
H : hauteur de pluie en mm tombée entre le début de la pluie et  $t_p$  : apparition du Q MAX
- pour son second terme, la somme du volume écoulé dans le même temps et du volume stocké à l'amont du point où nous voulons connaître les débits :  
 $Q_p [\delta (t_1 + t_2) + \beta t_p]$  (débit de pointe)

#### 431.1 Etablissement de la formule

Nous partons de l'équation des volumes, équation de base

$$1/6 \alpha \text{ H.A.C.} = Q_p [\delta (t_1 + t_2) + \beta t_p] \quad \text{dans laquelle (1)}$$

$\beta$  et  $\delta$  sont des coefficients (inférieurs à 1) de transformation de la pluie tombée en débit

$\alpha$  : coefficient de distribution spatiale de la pluie sur le bassin,  $\alpha = A^{-\epsilon}$

A : surface de bassin en hectares

C : coefficient volumétrique de ruissellement

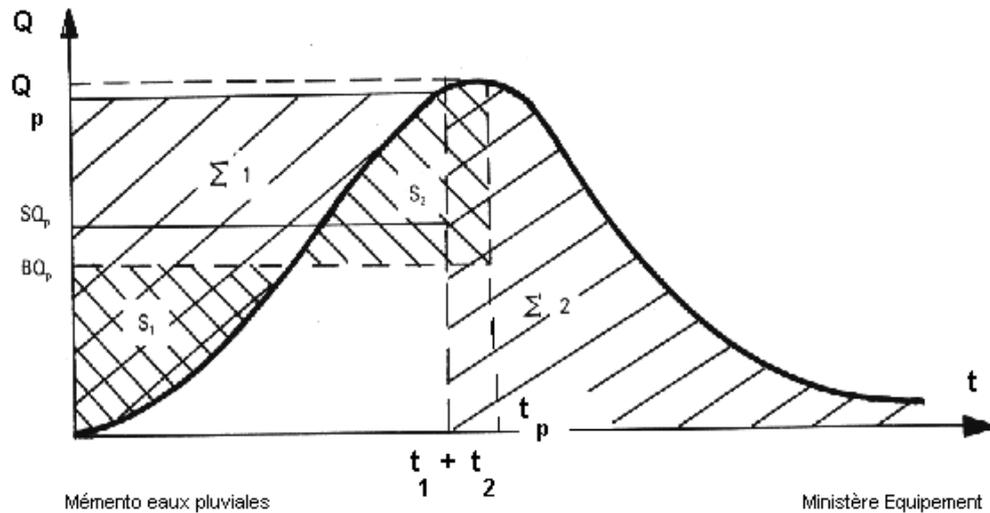
$Q_p$  : le débit maximum à l'exutoire

$t_p$  : temps de concentration (temps écoulé entre l'origine de l'averse et le moment du débit maximum à l'exutoire)

$t_1 + t_2$  : temps de ruissellement ( $t_1$  dans l'émissaire,  $t_2$  pour rejoindre l'émissaire)

Le terme  $\alpha \text{ H.A.C.}$  représente le volume d'eau net (celui utile pour la rivière) entre le temps zéro et le temps  $t_p$

La figure *infra* montre la signification du second membre de (1)



Le temps  $(t_1 + t_2)$  représente le temps de concentration  $t_c$ , puisque  $Q_p (t_1 + t_2) \delta$  est l'eau accumulée dans le bassin pour avoir  $Q_p$ .

Si on pose  $t_p = t_c$  :

l'équation (1) devient  $\frac{\alpha C A H}{6(\beta + \delta) t_c} = Q_p$  mais  $\frac{H}{t_c} = i_c$  (critique)

et 
$$Q_p = \frac{1}{6(\beta + \delta)} \alpha C A i_c \quad (\text{rationnelle}) \quad (2)$$

Le classement fréquentiel des intensités maximales (critiques) conduit à des courbes empiriques de forme :

$$i = a (t)^n \quad (3)$$

et Caquot a posé :

$$t_c = \mu \cdot I^c A^d Q_p^f \quad (4)$$

#### 431. 2 Utilisation de la formule

● Bassins urbains en France : Selon les instructions techniques du 22 juin 1977<sup>52</sup>

$$Q_{10} = 1,430 I^{0,29} C^{1,20} A^{0,72} \quad \text{nord} \quad \text{avec } i(t, \text{ période retour } 10) = 5,9 t^{-0,59}$$

$$Q_{10} = 1,601 I^{0,27} C^{1,19} A^{0,80} \quad \text{ouest} \quad \text{avec } i(t, \text{ période de retour } 10) = 6,7 t^{-0,55}$$

$$Q_{10} = 1,296 I^{0,21} C^{1,14} A^{0,83} \quad \text{sud} \quad \text{avec } i(t, \text{ période de retour } 10) = 6,1 t^{-0,44}$$

● Bassins urbains Drôme nord (pluviométrie de Bron)

$$\mu = 0,93 \quad c = 0,363 \quad d = 0,306 \quad \text{et } f = -0,2 \quad (4)$$

$$\beta = \delta = 0,75 \quad \varepsilon = 0,10 \quad (2)$$

$$i = 13 t^{-0,80} \quad (3)$$

$$Q_{10} = 1,660 \cdot I^{0,35} \cdot C^{1,19} \cdot A^{0,72}$$

Nous retrouvons bien les **TROIS paramètres** indiqués supra (remarque liminaire)

Par lecture directe sur une abaque, l'on obtient le débit  $Q$  en  $m^3/s$  correspondant à une pluie d'intensité critique décennale (période de retour de 10 ans) fondée sur la pluviométrie de Bron.

● Bassins urbains Drôme sud (pluviométrie d'Ancone)

<sup>52</sup> ensuite l'instruction précise :  $\Sigma$  des sous-bassins-versants, la détermination du  $\Phi$  des canalisations, le volume d'un éventuel bassin de rétention.

La formule différera de la précédente à cause du fait que l'intensité critique décennale sera donnée cf. supra § 412

$$\text{par } i_c = 22 t^{-0,71}$$

$$\text{et } Q = 3,060 . I^{0,30} . C^{1,18} . A^{0,71}$$

Par lecture directe sur un abaque l'on obtiendra le débit Q en m<sup>3</sup> / s correspondant à une pluie d'intensité critique décennale ( période de retour de 10 ans ) fondée sur la pluviométrie d'Ancone ( aérodrome de Montélimar).

● Cas des bassins ruraux

Il s'avère nécessaire d'introduire un " coefficient de lit " pour rendre mieux compte des débits à l'extrémité d'un émissaire en terrain naturel du fait des **pertes par infiltration** .

Ce coefficient de lit C<sub>l</sub> reste fonction de la nature du lit de la rivière et de sa pente

nature du lit	coefficient
lit imperméable dans roches non fissurées ou argile compact	0,85
lit avec couche d'argile à faible profondeur, pente forte	0,70
lit avec sol argilo-sableux, eau très trouble en crue	0,60
lit perméable, peu de sédiments en crue	0,50
lit perméable, eau claire en période de crue	0,40
lit très perméable, nappe phréatique alimentée par la rivière	0,30

Pour les rivières circulant sur des formations quaternaires très perméables, il existe une forte infiltration de l'eau le long du parcours, il importe donc de faire intervenir un coefficient d'infiltration OU coefficient de lit C<sub>l</sub> .

Enfin pour tenir compte de la **forme du bassin** , il faut introduire le coefficient v, tel que :

$$v = \left( \frac{L}{4A} \right)^{0,3}$$

où L représente le plus long parcours de l'eau et A la superficie du bassin-versant

si  $L = 2\sqrt{A}$  v = 1 cf. tableau infra

**Valeurs du coefficient de forme du bassin-versant " v "**

L / √A	1	1,25	1,50	2	2,50	3	4
v	1,50	1,30	1,20	1	0,90	0,80	0,70

● Bassin rural Drôme nord ( pluviométrie de Bron)

$$Q = 1510 . I^{0,35} . C^{1,19} . A^{0,72} . v . C_l$$

● Bassin rural Drôme sud ( pluviométrie d'Ancone)

$$Q = 2800 . I^{0,30} . C^{1,18} . A^{0,71} . v . C_l$$

Par **lecture directe** suivie d'une multiplication par v et C<sub>l</sub> l'on obtiendra le débit en m<sup>3</sup> / sec correspondant à une pluie d'intensité critique décennale ( période de retour de 10 ans), fondée pour l'un sur la pluviométrie de Bron, pour l'autre sur celle d'Ancone.

**431. 3 Exemple d'application de la formule sur l'Andançon :**

Cette rivière drômoise (du nord) affluent du Bancel à St Rambert d'Albon présente une allure torrentielle et s'écoule dans un couloir très étroit comportant des pentes latérales très importantes.

Les pentes sont boisées sur environ 20% de leur superficie.  
Le bassin-versant couvre une superficie  $A = 430 \text{ ha} (4,3 \text{ km}^2)$   
Le lit se déroule sur  $L = 4,5 \text{ km}$   
La pente moyenne reste forte  $i = 30 / 100 (0,30)$

Evaluons les paramètres :  $C$ ,  $v$  et  $C_1$

$C$  : les terres argileuses avec de fortes pentes dans la majeure partie du bassin et des îlots boisés ne devant pratiquer qu'une faible rétention et qu'un faible ralentissement des eaux superficielles nous incitent à prendre un coefficient volumique d'écoulement  $C = 0,40$

-  $v$  : nous savons que  $\frac{L}{A} = \frac{4,5}{4,3} = 1,05 \approx 1$  donc  $v = 1$

$\sqrt{A} = \sqrt{4,3} = 2,1$

-  $C_1$  : le lit imperméable et la forte pente nous incitent à prendre  $C_1 = 0,70$

L'abaque Drôme zone nord donne directement avec  $A = 430 \text{ ha}$ ,  $i = 0,30$  et  $C = 0,4$

$$Q_{10} = 14 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Si l'on applique les correctifs supra pour la forme et le lit et une réfraction de 0,91 de zone rurale

$$Q_{10} = Q \cdot 0,91 \cdot v \cdot C_1$$

$$Q_{10} = 8,9 \text{ m}^3 / \text{s}$$

### 43. 2 Formule de Turrazza, bassins-versants de surface $> 2 \text{ km}^2$

Comme dans le cas de la formule de Caquot, cette méthode nécessite la connaissance de la courbe d'intensité des averses en fonction de leur durée (intensité critique ou d'intensité maximale de projet):

$$Q_{10} = \frac{1000}{3600} \cdot C_r \cdot C_1 \cdot i_c \cdot S$$

$Q_{10}$  : crue décennale en  $\text{m}^3 / \text{s}$ , si  $i_c$  (intensité critique de la pluie) s'exprime en  $\text{mm/h}$  et  $S$  (surface du bassin-versant) en  $\text{km}^2$ ,

$C_r$  : coefficient volumétrique de ruissellement ou d'écoulement,

$C_1$  : coefficient de lit ou d'infiltration, car pour les rivières circulant sur les formations quaternaires très perméables, il existe une forte infiltration de l'eau le long du parcours au travers du lit du cours d'eau.

#### 432. 1 Détermination de l'intensité critique (de projet) de la pluie :

Elle est donnée directement en fonction du temps de concentration par la courbe d'intensité des averses

$$i = a (t_p)^n \quad \text{OU} \quad \ln i = \ln a + n \ln t_p$$

Cette courbe dite courbe du cas critique représente les intensités maximales d'averses, selon les relevés pluviométriques correspondant à une période d'environ 10 ans.

#### 432. 2 Détermination du temps de concentration :

Rarement l'on dispose d'une mesure directe, on doit alors recourir à divers procédés :

● Assimiler le temps de concentration  $t_c$  au temps de réponse du bassin ou "Lag time" des auteurs américains. Il s'agit du temps qui s'écoule entre le centre de gravité de l'averse celui de la vague de crue qui en résulte.

Ce temps peut se mesurer assez facilement d'autant plus qu'il ne dépend pas de l'importance de la crue considérée.

● Utiliser des formules rationnelles où le temps de concentration correspond au temps d'écoulement en surface  $t_1$  augmenté du temps d'écoulement  $t_2$  dans le réseau lequel se subdivise entre les talwegs de second ordre (ruisselets, caniveaux) et en émissaire (rivière, égout).

Pour Caquot donc,  $t_c = t_1 + t_2$   
et il est fonction de  $\mu \cdot I^c \cdot A^d \cdot Q_{10}^f$  (avec  $\mu$  représentant la forme du bassin-versant)

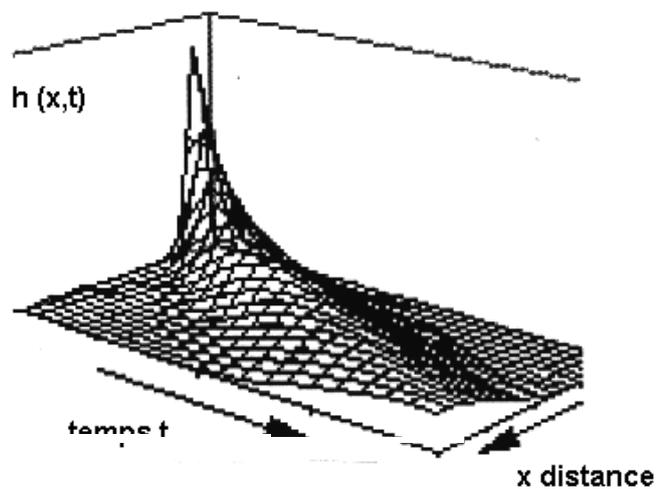
● Se servir des formules conceptuelles. En ce qui concerne l'écoulement en réseau<sup>53</sup>, Monsieur Funcke de l'Université de Bochum a estimé que l'effet de trajet simple combiné avec un stockage linéaire donne la réponse à la vague d'afflux, *Impulsiveantwort*, d'un bassin versant urbain

Cette réponse à la vague d'eau, *impulsive antwort*,  $h(x,t)$  est représentée par une fonction bidimensionnelle cf. figure infra

L'on remarque que pour une section  $\Sigma$  à une distance  $x$ , la réponse à la vague d'afflux sera une fonction bidimensionnelle de la distance et du temps. La distance  $x$  entre le point d'entrée de l'afflux dans le réseau et l'exutoire est associée au temps de façon à pouvoir prendre en considération l'effet de rétention distinct dans les caniveaux ou ruisselets sur ledit afflux réparti spatialement  $q_z = (x,t)$

$$Q(t) \text{ à l'exutoire} = i_n (t - T)$$

T : décalage



Université de Bochum

Funcke

DONC sur un bassin-versant **urbain** l'on peut ainsi estimer le " temps de concentration " au sein du réseau et à partir de là calculer le débit à l'exutoire

● Employer une formule expérimentale, reliant le temps  $t_c$  à la superficie  $S$  du bassin-versant, à la pente moyenne  $i$  des terrains et à une dimension linéaire représentative de la grandeur du bassin-versant.

L'école italienne s'est montrée fertile en la matière après Turrazza et Ventura, nous retiendrons celle de Pasini :

$$t_c (\text{heures}) = \alpha \frac{\sqrt[3]{SL}}{\sqrt{I}}$$

avec  $I$  = pente, et  $L$  = plus long parcours de l'eau en km

$S$  = superficie du bassin-versant en  $\text{km}^2$

$\alpha$  est voisin de 0, 1 en Italie du nord, l'on prendra en pratique :

$\alpha = 0,085$  pour les bassins-versants où le rapport de la longueur à la largeur ne dépasse pas 2,

$\alpha = 0,075$  pour les bassins-versants plus allongés

**Application au cas du Roubion**

Les deux courbes infra établies expérimentalement selon les conditions de la crue du 1<sup>er</sup> oct. 1960 se trouvent corroborées par la formule de Panini puisque le temps de concentration calculé par cette dernière est égale à 12 heures

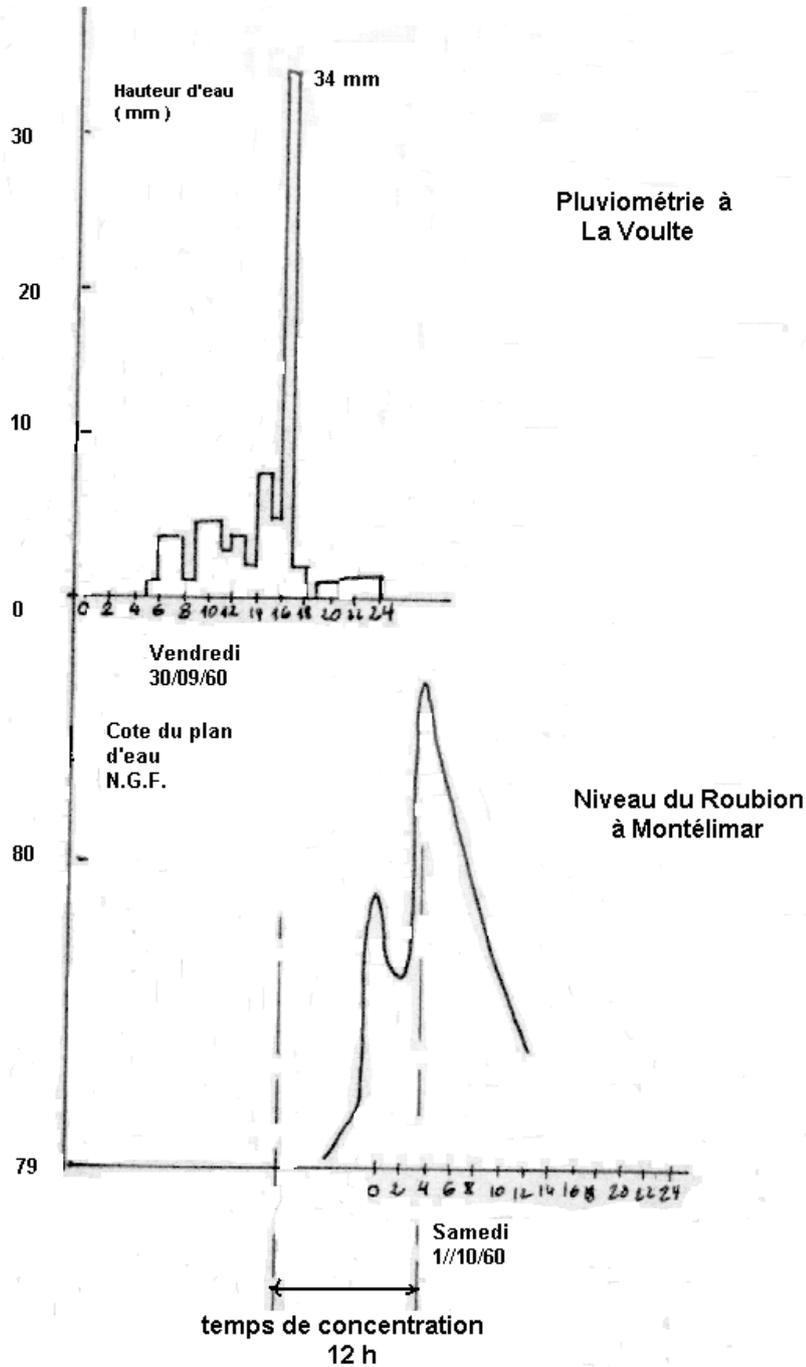
<sup>53</sup> le réseau comprend les caniveaux (talwegs secondaires) et les canalisations d'égout (talwegs principaux)

$$t_c = \frac{0,085 \cdot 0,26}{0,0018}$$

$Q_{10} = 480 \text{ m}^3/\text{s}$  (Roubion 60%+ Jabron 40%)

$Q_{20} = 1,15 Q_{10} = 550 \text{ m}^3/\text{s}$  vérifié en 1960

### Mesure du temps de concentration du Roubion



### 433. 3 Détermination du coefficient moyen de ruissellement<sup>54</sup> volumétrique, C

Dans la méthode dite "rationnelle" (Caquot) ce coefficient représente le rapport entre la pluie qui ruisselle et qui est évacuée par l'émissaire (pluie utile, ou pluie nette) et la pluie totale tombée, ou  $K_1 = \text{volumereçu} / \text{volume tombé}$ ; la différence se trouvant représentée par :

- les eaux stockées superficiellement (prairies, bois, marécages...)
- les eaux infiltrées et non restituées aux cours d'eaux (donc devenues souterraines)
- les eaux évaporées.

Ce coefficient dépend d'un très grand nombre de facteurs : forme et dimension du bassin-versant, perméabilité du sol, nature géologique du sous-sol, nature et abondance de la végétation, pentes, etc. ....

En principe l'on dénombre TROIS facteurs essentiels :

- perméabilité du sol,
- pente,
- végétation

Il devient donc **impossible de donner une formule mathématique** de C en fonction des différents facteurs qui l'influencent, il importe donc de recourir à l'expérience.

Pratiquement, on utilise des valeurs obtenues dans des bassins-versants de conditions voisines où des débits résultant d'une pluie donnée ont pu être mesurés avec précision. L'état hygrométrique du sol avant la pluie considérée joue un grand rôle et il convient de tenir compte de la saison qui, au surplus, influence la végétation.

Pardé donne pour la région méditerranéenne des valeurs qui paraissent excessives pour la Drôme. Pratiquement l'on pourra adopter les valeurs du tableau infra

#### ***Valeurs du coefficient d'écoulement " C "***

<b>Nature des surfaces</b>	<b>Exemple de référence</b>	<b>C</b>
Villes à habitations très denses (toitures, chaussées et trottoirs modernes)	Ville de Valence	0,90
Sols à roches non fissurées. Terrains volcaniques		
Villes à habitations denses. Paysages à larges joints. Trottoirs en terre battue.	Ville de Bourg-de-Péage	0,60
Villages où l'assainissement est moderne. Sols "battants" d'argile compacte ou sols très alcalins sans cultures.		
Villes à habitations moins denses avec espaces verts assez fréquents. Villages où l'assainissement est partiel mais où les voies sont imperméabilisées.	Ville de Malissard	0,50
Villes ou villages avec voies non imperméabilisées		0,40
Sols argileux compacts avec cultures céréalières		
Sols argileux ou argileux-sableux avec cultures maraîchères		0,35
Sols sableux-argileux sans cultures		0,30
Quartiers résidentiels avec larges espaces verts		0,20
Sols sableux-argileux avec cultures céréalières ou avec plantations fruitières aérées. Terrains en friches.		
Sols sableux-argileux friables Couverture de broussailles. Prairies		0,15
Plantations fruitières denses.		
Sols sableux, caillouteux, ou gravo-sableux	Plantations et vergers très denses.	0,10
Prairies riches assez pentues. Forêts peu denses en futaie.		
Terres à bruyère, chênes-nains, etc.		
Sols sableux protégés par taillis		0,08
Sols marno-calcaires altérés. Luzernières à faible pente.		
Forêts avec taillis. Bas-fonds marécageux.		

<sup>54</sup> on dit aussi d'écoulement

Sols sableux non protégés. Forêts très denses. Sols très marécageux

0,05

#### 433. 4 Détermination du coefficient d'infiltration dans le lit , C<sub>1</sub>

Expérimentalement on peut envisager un bief de longueur L pour lequel on peut considérer que les apports ( affluents, sources, fossés et départs pour l'irrigation ) restent nuls. Deux mesures de débit en aval et en amont donnent alors respectivement les valeurs de

$$Q_1 \text{ et } Q_2$$

Le ratio d'infiltration dans le lit deviendra alors :

$$\frac{Q_2 - Q_1}{L}$$

Q<sub>1</sub> et Q<sub>2</sub> s'expriment en litres / sec. et L en mètres

Le rapport  $\frac{Q_2 - Q_1}{Q_2}$  fournit la valeur de C<sub>1</sub> pour le bief considéré

● Des formules furent établies pour chiffrer ces pertes par percolation dans le lit , par exemple celle d'Ingham établi par cet auteur lors d'un séjour aux Indes.

Les Américains préconisent la formule de Davis et Wilson qui se présente ainsi :

$$P = 0,45 \cdot C \cdot \frac{L \cdot \chi}{4 \cdot 10^6 \cdot 3650 \sqrt{V}} \cdot \sqrt[3]{d}$$

P : pertes en m<sup>3</sup> / sec par longueur L

d : profondeur de l'eau en mètres

χ : périmètre mouillé en mètres

V : vitesse moyenne du courant en m/seconde

C: coefficient dépendant de la perméabilité des parois et variant de .... 1 pour les revêtements en béton épais à .... 70 et plus pour les rivières et canaux avec lit en gravier

En ce qui concerne les cours d'eau naturels l'on peut utiliser pour C les valeurs suivantes

Texture du lit	C
terrains argileux	12
terrains limoneux	20
terrains finement sableux	40
sables moyens	50
sables et graviers	70
graviers et galets	80

#### Application au cas de la Barberolle

Cette rivière prend sa source au pied du Vercors et se jette dans le Rhône à Valence (cf. carte infra)

Sur le bief Barbières-Les Massedides, les mesures de débit donnent des chiffres d'infiltration voisins de 60 l/sec/km.

Le lit est constitué de gros galets, faiblement cimentés, donnant une perméabilité très grande.

Par application de la formule supra (Davis et Wilson) et en utilisant un coefficient C = 80, nous obtenons (pour 1 km de lit) ... 0,05 m<sup>3</sup>/s soit.... 50 l/s/km, ce qui fournit une valeur d'autant plus correcte que le coefficient C doit avoir une valeur supérieure à 80.

Cette formule d'application assez laborieuse est remplacée par le tableau infra où figure un certain nombre de valeurs de  $C_1$  en fonction de la nature du lit d'après des observations effectuées sur les cours d'eau drômois.

### Valeurs du coefficient de lit " $C_1$ " (bassins ruraux)

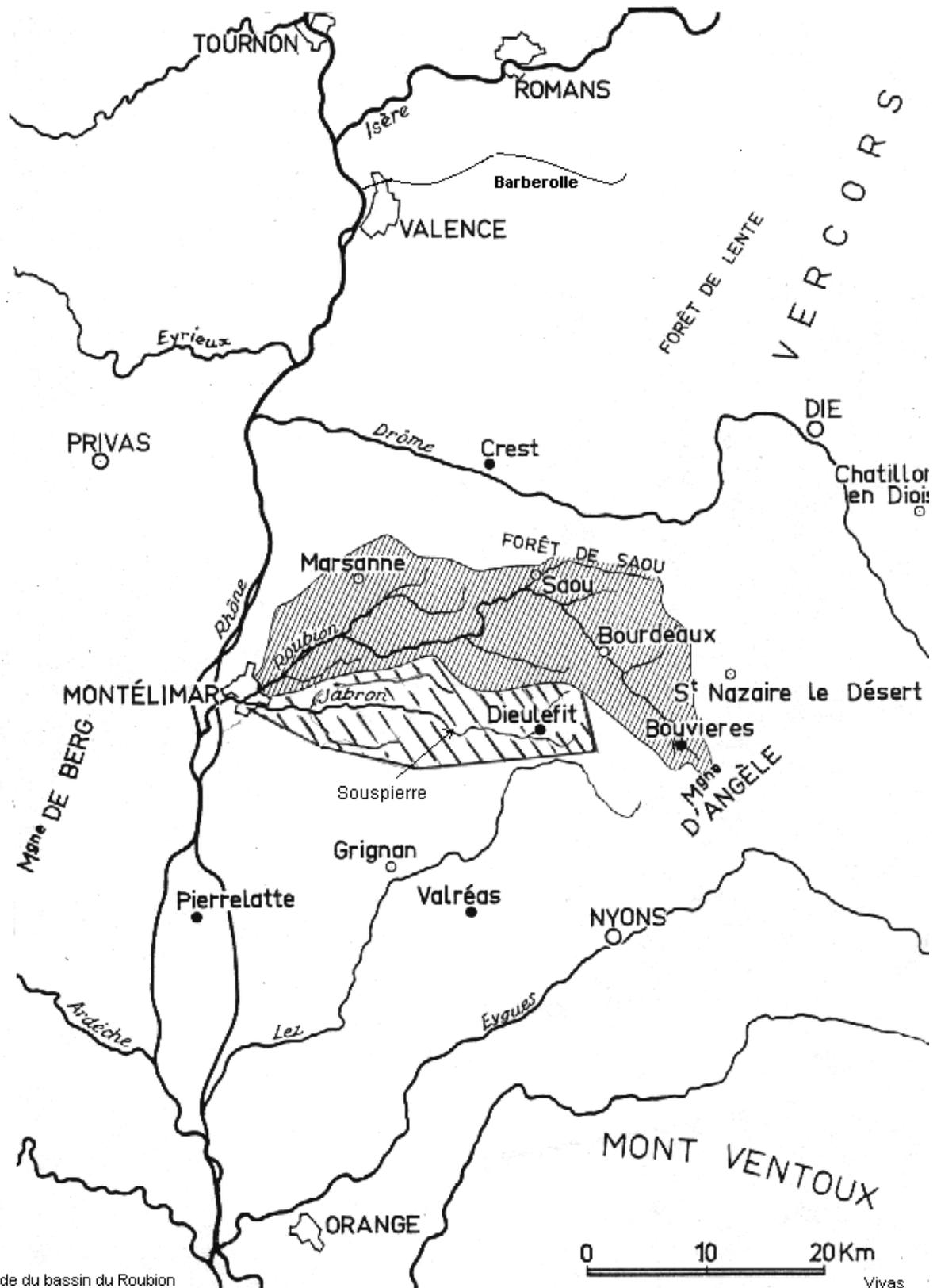
Nature du lit	Exemple de référence	" $C_1$ "
<u>Lit imperméable</u> dans rocher non fissuré ou argile très compacte. Lit torrentiel avec forte pente.	Torrents du Vercors	0,85
<u>Lit relativement imperméable</u> dans rocher fissuré, calcaire, ou lit colmaté par particules fines : argile ou kaolin Couche d'argile à faible profondeur. Nappe stable au-dessus du lit de la rivière. Pente assez forte.		0,70
<u>Lit relativement perméable</u> Sols argileux-sableux, sables et graviers peu colmatés Eaux très troubles en période de crue. Pente moyenne $\approx$ de 1% Nappe au-dessus du lit alimentée par la rivière en période de hautes eaux.		0,60
<u>Lit perméable</u> Graviers ou galets peu colmatés. Peu de sédiments en période de crue. Pente moyenne Nappe alimentée normalement par la rivière.		0,50

N.B. La formule de Turrazza :  $Q_{10} = C_r \cdot C_e \cdot i_c \cdot S \cdot \left( \frac{1000}{3600} \right)$

ne tient pas compte des pertes par évaporation dans la rivière (celles-ci n'atteignent que 1 à 2 % dans la Drôme).



### Localisation des bassins du Roubion et du Jabron



## 5 Critères concernant le débit

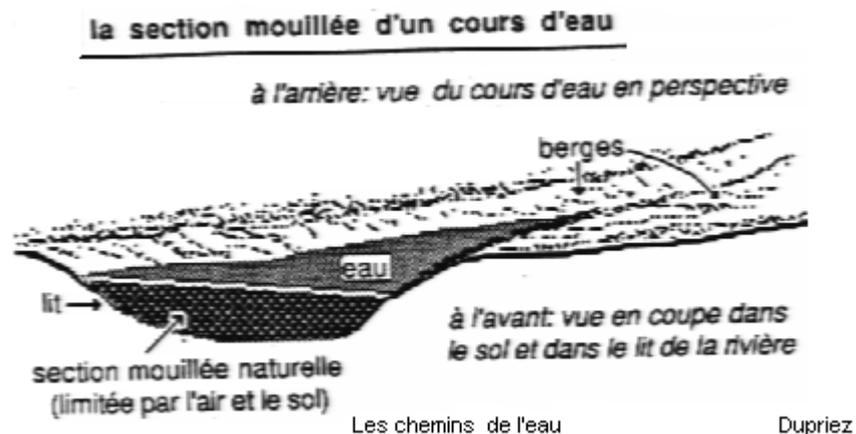


### 51 Définitions

Le débit d'un cours d'eau représente la quantité d'eau qu'il évacue. Il dépend de la section mouillée  $\omega$

A un endroit donné, celle-ci est délimitée par la ligne marquant les berges et le fond, et la limite entre l'air et l'eau.

Voir figure infra.



Le débit dépend aussi de la vitesse du courant  $u$  qui, en fonction de la pente, peut être torrentielle, rapide, lente, quasi stagnante.

$$Q = u \cdot \omega$$

Selon l'importance du cours d'eau, le débit s'estime en l/s en  $m^3/s$  voire en milliers de  $m^3/s$ .

### 52 Expressions du débit

On distingue plusieurs expressions du débit :

- Le débit **instantané** d'un cours d'eau mesuré à un instant précis
- Le débit **moyen** est la moyenne des débits mesurés au cours d'une unité de temps (un mois, une saison, pluvieuse, une année, une décennie....) Pour l'établir, il faut effectuer de nombreuses mesures à intervalles réguliers.
- Le débit de **crue** est celui qui se constate au moment d'une crue. Il doit être établi à partir d'observations portant sur plusieurs décennies.
- Le débit d'**étiage** correspond à la période de l'année au cours de laquelle le cours d'eau atteint son niveau le plus bas.

Dans le tableau infra, sont portés les chiffres correspondant à quelques fleuves ( en milliers de  $m^3/s$ )

	module (moyenne)	étiage	crue
Rhin	2,2	0,78	9
Loire	0,65	0,075	10
Garonne	0,63	0,10	9
Seine	0,40	0,05	1,65

L'on remarque que le coefficient multiplicateur permettant de passer de la moyenne à la crue s'élève :

pour le Rhin à 4  
pour la Seine à 4  
pour la Loire à 15

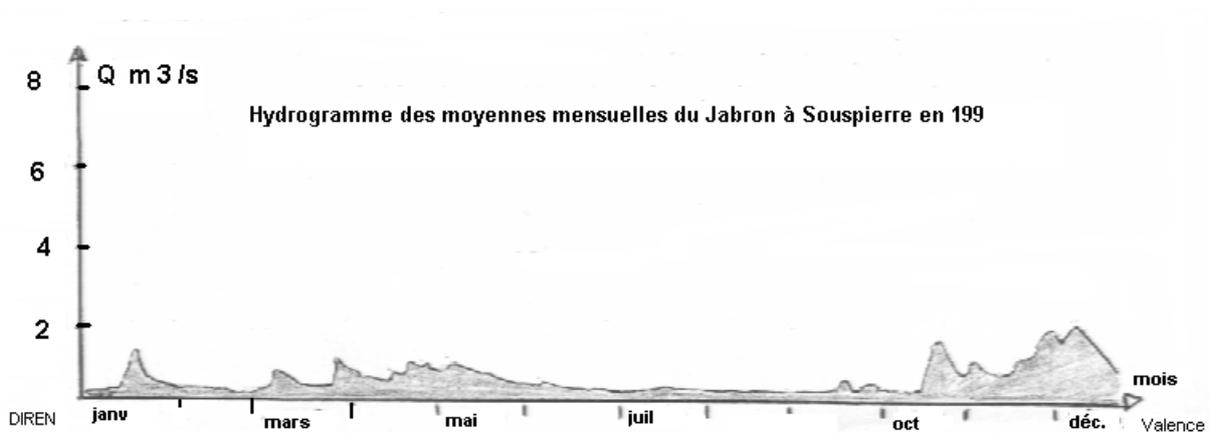
## 53 Débit moyen (habituel)

### 53.1 Types de débit

Il peut se définir selon l'unité de temps de référence :

débit moyen journalier  
débit moyen mensuel  
débit moyen annuel

Cf. hydrogramme infra sur le Jabron en '99.



Ce graphique traduit les débits moyens quotidiens en '99 figurant dans le tableau à la page suivante

Le Jabron à SOUSPIERRE												
Code hydrologique : V4455010												
Bassin versant : 85 km <sup>2</sup>												
Gestionnaire : D.I.R. EN Rhône-Alpes (S.E.M.A.)												
Année 1999												
Dernière mise à jour le 07/02/2000												
Débits validés bons												
Débit moyen annuel : # 0.598 m3/s												
Hydraulicité : 75%												
Débits moyens journaliers (m3/s)												
	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
1	# 0.253	0.356	# 0.291	0.756	0.747	0.411	0.349	# 0.148	# 0.179	0.260	0.642	1.64
2	# 0.225	0.358	0.288	0.691	0.719	0.384	0.340	# 0.147	# 0.192	0.223	0.628	1.70
3	# 0.231	0.361	# 0.278	0.664	0.711	0.379	# 0.228	# 0.293	# 0.225	0.501	1.29	1.78
4	# 0.226	0.363	1.97	0.616	0.851	0.427	# 0.219	# 0.167	# 0.229	0.342	0.976	1.69
5	# 0.237	0.363	1.23	0.991	1.36	0.345	# 0.223	# 0.165	0.215	0.215	0.881	1.56
6	# 0.220	0.368	0.851	0.557	1.08	1.00	0.511	# 0.166	0.209	# 0.198	0.978	1.43
7	# 0.229	0.353	0.702	0.600	0.971	0.525	0.228	# 0.185	0.212	# 0.183	0.900	1.32
8	0.223	0.339	0.577	0.609	0.987	0.467	# 0.213	# 0.426	# 0.196	# 0.179	0.791	1.23
9	# 0.222	0.405	0.615	0.555	0.940	0.390	# 0.198	# 0.185	# 0.192	# 0.163	0.750	1.38
10	0.390	0.381	0.581	0.526	0.896	0.417	# 0.201	# 0.196	# 0.191	# 0.139	0.696	2.58
11	0.416	0.349	0.503	0.526	0.862	0.391	# 0.181	# 0.164	# 0.191	# 0.164	0.673	2.04
12	0.317	0.321	0.446	0.526	0.827	0.377	# 0.164	# 0.158	# 0.191	# 0.163	0.693	1.89
13	0.290	0.306	0.427	0.507	0.790	0.339	# 0.172	# 0.153	# 0.187	# 0.190	0.657	1.75
14	0.292	0.294	0.408	0.489	0.754	0.333	# 0.189	# 0.149	# 0.188	# 0.193	0.688	1.77
15	0.322	0.308	0.391	1.01	0.733	0.378	# 0.172	# 0.150	0.226	# 0.179	0.654	1.65
16	# 0.303	# 0.295	0.392	0.754	0.686	0.304	# 0.161	# 0.204	# 0.199	# 0.177	0.659	1.55
17	1.18	0.318	0.398	0.712	0.702	0.304	# 0.162	# 0.193	# 0.203	# 0.179	0.628	1.41
18	2.97	0.308	0.392	0.644	0.643	0.280	# 0.139	# 0.174	# 0.208	# 0.187	0.669	1.36
19	1.26	0.328	0.363	0.618	0.674	0.292	# 0.154	# 0.168	0.282	0.362	1.32	1.41
20	0.857	# 0.332	0.362	0.631	0.752	0.303	# 0.153	# 0.230	0.660	0.486	1.04	1.33
21	0.704	0.333	0.362	0.733	0.682	0.291	# 0.149	# 0.182	0.250	<b>0, 89</b>	1.06	1.21
22	0.613	0.325	0.362	1.48	0.601	0.280	# 0.147	# 0.169	0.214	2.05	0.973	1.14
23	0.548	0.319	0.362	0.943	0.551	0.285	# 0.152	# 0.165	0.202	2.01	1.02	1.10
24	0.513	0.294	0.362	0.886	0.532	0.267	# 0.132	# 0.159	# 0.180	1.93	1.16	1.05
25	0.466	0.302	0.377	0.824	0.501	0.253	# 0.138	# 0.153	# 0.169	1.57	1.22	1.04
26	0.451	# 0.298	0.329	0.807	0.480	0.265	# 0.153	# 0.161	# 0.374	1.28	1.27	1.02
27	0.439	# 0.309	2.17	0.998	0.469	0.297	# 0.151	# 0.163	0.326	1.10	1.37	0.985
28	0.413	# 0.283	1.45	0.874	0.449	0.283	# 0.152	# 0.149	0.372	0.960	1.48	0.978
29	0.505	1.06	0.810	0.422	0.279	# 0.165	# 0.150	0.236	0.858	1.61	0.924	
30	0.423		0.887	0.775	0.399	0.277	# 0.160	# 0.153	0.321	0.769	1.64	0.873
31	0.372		0.820		0.420		# 0.150	# 0.156		0.692		0.854
Maxima instantanés mensuels (m3/s)												
4.81	0.621	3.25	3.44	1.98	2.15	3.45	2.42	1.86	<b>19, 2</b>	2.87	4.37	
Moyennes mensuelles mesurées (m3/s)												
# 0.520	# 0.331	# 0.652	0.724	0.716	0.161	# 0.188	# 0.180	# 0.241	# 0.848	0.971	1.41	
Hydraulicité %												
# 65%	# 30%	# 51%	57%	56%	51%	# 57%	# 79%	# 77%	# 123%	119%	169%	
Moyennes mensuelles naturelles reconstituées (m3/s)												
# 0.520	# 0.331	# 0.652	0.724	0.716	0.361	# 0.188	# 0.180	# 0.241	# 0.848	0.971	1.41	

Il peut se définir aussi selon la période de retour prise en référence.

débit moyen quinquennal

débit moyen décennal

débit moyen duodécennal

débit moyen trentenaire

Bien entendu, ces deux paramètres se croisent et l'on rencontre par exemple : des débits moyens mensuels quinquennaux (période de retour 5 ans) **OU** des débits moyens annuels trentenaires (période de retour 30 ans)

### 53.2 Notion de module annuel

Il peut se définir comme le débit moyen annuel ( $m^3/s$ ) en un point d'un cours d'eau **évalué par la moyenne des débits moyens annuels** mesurés sur une période (moyenne pondérée).

#### 532.1 Application au Jabron

A partir du graphique infra, l'on peut écrire que : Le module annuel de débit du Jabron se monte à  $0,83 m^3/s$  à Souspierre, ceci étant mesuré sur une durée de 29 ans ( de '70 à '99 ).

#### Données hydrométriques(DIRENE de Valence)

Caractéristiques de la station V 4455010 (Bassin versant 85 km <sup>2</sup> )				
Estimations sur la période 1970 - 1999			Année 1997 / 1998	
<b>Crue décennale</b> (septembre à août)	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>34</b> (entre 28 et 47)	<i>Crue maximale</i> (septembre à août)	
<b>Module</b> (septembre à août)	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>0,83</b> (entre 0,69 et 1)	<i>Moyenne annuelle</i> (septembre à août)	
<i>Lame d'eau</i>	<i>mm</i>		<i>Hydraulicité %</i>	
			<i>Lame d'eau</i>	<i>mm</i>
<b>QMNA quinquennal</b> (janvier à décembre)	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>0,14</b> (entre 0,12 et 0,16)	<b>QMNA</b> (janvier à décembre)	<b>0,2</b>
<b>Etiage quinquennal</b> (janvier à décembre)	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>0,11</b> (entre 0,093 et 0,13)	<b>Etiage</b> (janvier à décembre)	<b>0,18</b>

QMNA : débit moyen annuel le plus faible de fréquence quinquennale.

## 54 Débit de crue

### 54.1 Définition

Une crue correspond à l'augmentation du débit ( $m^3/s$ ) d'un cours d'eau dépassant plusieurs fois le débit moyen ; elle se traduit par une augmentation de la hauteur d'eau.

### 54.2 Les crues célèbres

#### 542.1 A l'échelle terrestre

Le fleuve Rouge (Tonkin) en 1915

Le Brahmapoutre, au Pakistan occidental

Le Yang-Tsé-Kiang ( Chine )

Le fleuve Jaune ( Chine )

Le West Nueces ( Texas ) qui débita  $15\,600\text{ m}^3/\text{s}$  pour un bassin de  $1800\text{ km}^2$  en 1935

### 542.2 A l'échelle française

1658 : La Seine à Paris  $2500\text{ m}^3/\text{s}$  pour cote 8,81 m

1910 : La Seine à Paris  $2180\text{ m}^3/\text{s}$  pour cote 8,42 m

1930 : Le Tarn à Montauban, 7 m d'eau dans la ville, 200 morts, 10 000 sinistrés.

### 54.3 Origine des crues

#### 543.1 Pluviale - Fonte des neiges :

La plupart du temps, elles trouvent leurs origines dans les cyclones tropicaux, les averses méditerranéennes, la fonte des neiges.

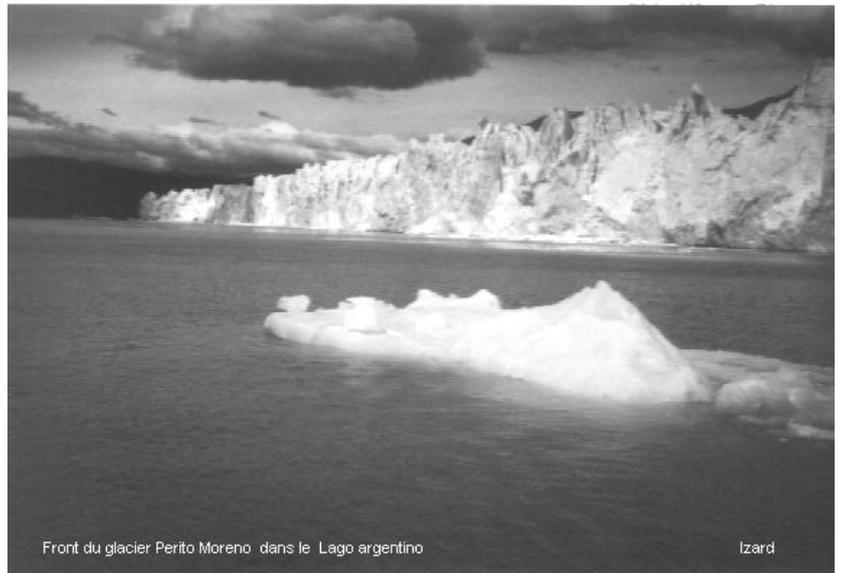
Il convient de signaler à ce sujet la **mousson** qui revient chaque année en Inde, les vents de l'océan indien apportent des nuages qui se heurtent à l'Himalaya ; la vapeur d'eau se condense et crée des pluies : un mur noir de nuages avançant à  $50\text{ km/h}$  apportent des trombes d'eau allant jusqu'à  $1\,000\text{ mm}/24\text{ heures}$  (mesuré à Cherra-Punji)

#### 543.2 Autres raisons

● Eruption sous  
glaciaire ou **Jökulhaup** :

Ainsi le glacier " Perito moreno " descend sur  $30\text{ km}$  depuis les Andes jusqu'au lac Argentino, son front aval de  $4\text{ km}$  de large se présente sous la forme d'une falaise de glace de  $60\text{ mètre}$  de hauteur.

cf. photographie ci-contre  
prise latéralement

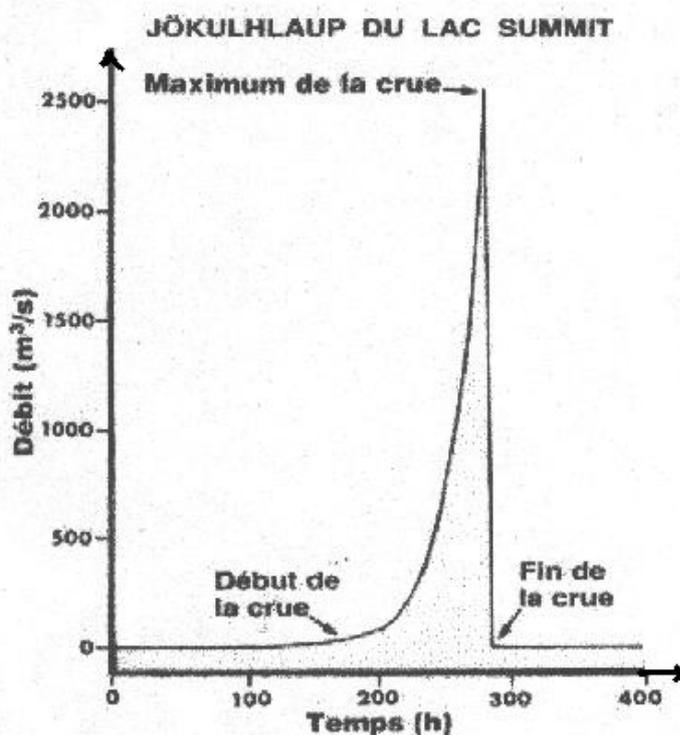


S'avancant dans le lac, il le traverse d'une rive à l'autre et quand il l'a atteinte il retient prisonnière l'eau du lac à l'amont du glacier

cf. photographie  
ci-contre



Au bout de quelques années l'eau à l'amont monte par drainage du bassin-versant et quand elle atteint une certaine hauteur, sa pression brise la glace il se crée une crue sous forme d'une vague énorme et brève.



cf. ci-contre l'hydrogramme du lac Summit au Canada

Environnement Canada

#### 54.4 Inondation corollaire de la crue.

##### 544. 1 Définition

Une inondation peut se définir comme une submersion (rapide ou lente) d'une zone pouvant être habitée, elle correspond aux débordements des eaux lors d'une crue.

Les inondations ne constituent pas des manifestations spontanées et mystérieuses, mais des phénomènes parfaitement naturels. Elles frappent rarement sans préavis, et se produisent généralement dans des zones déjà reconnues comme critiques : les plaines inondables.

##### 544. 2 Plaine inondable

Il s'agit de cette étendue relativement plate attenante à un lac ou à une rivière et susceptible d'être envahie par les eaux de crue. Elle fait partie intégrante de l'espace vital du cours d'eau que celui-ci peut occuper périodiquement.

Par ailleurs, c'est dans la section principale d'écoulement (la partie de la plaine inondable où les eaux s'écoulent le plus rapidement) que les inondations produisent leurs plus grands ravages.

### 544. 3 Phénomène naturel

Le mot inondation devient souvent synonyme de dommages matériels, voire de pertes de vie. Il s'agit toutefois d'un phénomène naturel nécessaire à la survie et à la santé d'importants segments de l'écosystème.

Les vallées et plaines inondables sont soumises à des cycles de hauts et faibles niveaux d'eau qui s'étendent sur de longues périodes ; elles subissent également des fluctuations rapides et saisonnières

cf. photographie ci-contre :

vallée inondable par la rivière la Meuse qui envahit caves et rez-de-chaussée



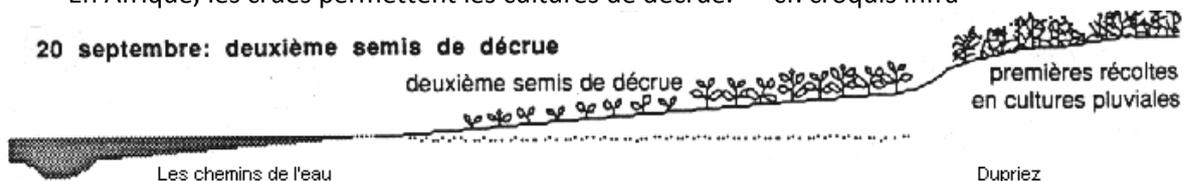
Inondation de la Meuse en '99

revue du parlement européen

L'écologie des plaines inondables, des rivières et des lacs, s'est adaptée aux cycles annuels et plus longs. Pour les eaux de surface peu profondes et les eaux de marécages, cette fluctuation de niveau est essentielle au maintien de leur équilibre et de leur productivité écologiques. Si les niveaux de l'eau subissent des changements sur de longues périodes, la végétation et l'habitat suivront eux aussi une succession sur une longue période. Le sens de ce changement peut être d'un habitat aquatique vers un système terrestre, ou vice-versa.

Dans les marécages, ce changement reste la règle. Dans ces milieux, habitent des collectivités dynamiques qui subissent des modifications constantes en réponse à diverses pressions physiques, chimiques et biologiques.

En Afrique, les crues permettent les cultures de décrue. cf. croquis infra



### 544.3 Action anthropique

Le développement économique et la croissance de la population ont exercé des pressions qui eurent pour effet de modifier le régime des eaux de surface et le paysage des plaines inondables.

Les efforts humains visant à restreindre la zone active des plaines inondables se multiplient : construction de barrages, de digues et d'ouvrages de dérivation, dragage et réaligement des lits, assèchement des marécages.

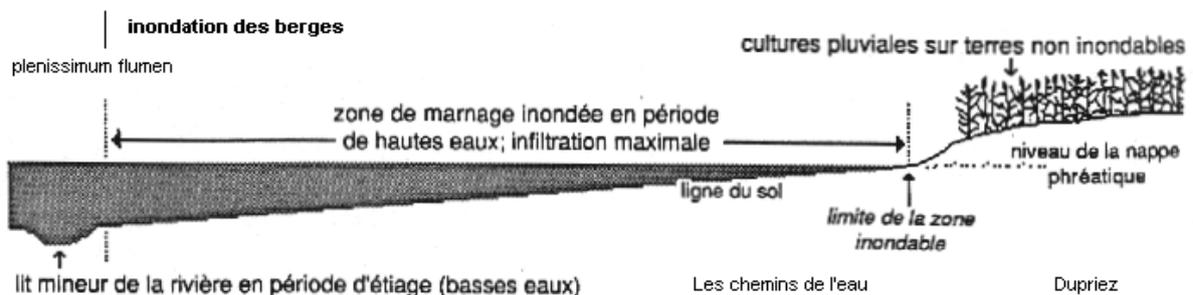
Ces mesures qui profitent sans nul doute au développement économique, ont par ailleurs, entraîné le déclin des habitats, des poissons et de la faune, et ont perturbé des écosystèmes entiers. Des marécages furent éliminés, l'érosion littorale s'accrut, et les plaines inondables perdirent leur capacité de filtration des sédiments.

## 54. 5 Panorama sur les inondations

### 545.1 Caractéristiques d'un cours d'eau :

- Lit **mineur** : Un cours d'eau s'écoule habituellement dans son lit mineur, mais peut en sortir, zone de marnage. Le point le plus extrême atteint par l'eau correspond au " *plenissimum flumen* "

. Voir figure infra



- Lit **majeur** : Espace occupé par un cours d'eau lors d'une inondation ; voir supra  
Il peut être scindé en deux zones :

Zone d'écoulement : au voisinage du lit mineur où le courant a une forte vitesse.

Zone de stockage des eaux : où la vitesse est faible, ce stockage est fondamental car il permet le laminage des crues, c'est-à-dire la réduction de la montée des eaux à l'aval.

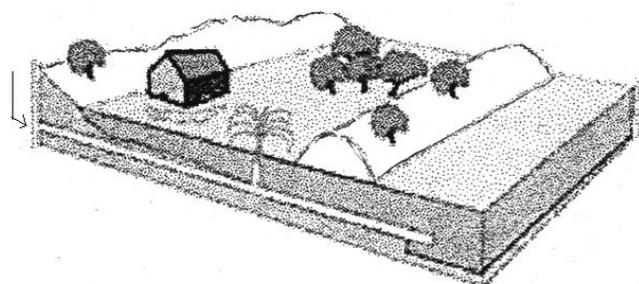
### 545.2 Les types d'inondation

A l'échelle terrestre, les inondations causent plus de 50% des catastrophes naturelles, en moyenne 20 000 morts par an.

A l'échelle métropolitaine, 22 000 km<sup>2</sup> sont reconnus comme particulièrement inondables et 2 000 000 de riverains se trouvent concernés. Elles interviennent de différentes façons :

- Pardébordement **direct** : Le cours d'eau sort de son lit mineur pour occuper son lit majeur
- Pardébordement **indirect** : Les eaux remontent (siphonnage) par les nappes alluviales et les réseaux d'eaux pluviales.

Ainsi le quartier de Nevers sis au sud de la Loire se trouve inondé bien que protégé par une levée, ce phénomène est appelé " regond "



Débordement indirect

cf. schéma ci-contre

- Par **stagnation** d'eaux pluviales : liée à une capacité insuffisante d'infiltration, d'évacuation des sols ou des réseaux d'eaux pluviales lors de pluies anormales.

- Par **ruissellement** en secteur **urbain** : En secteur urbain, les orages intenses (120 mm de pluie en deux heures à Nîmes le 3 oct. 1988) peuvent occasionner un très fort ruissellement - en raison des aires goudronnées - qui va saturer les capacités du réseau d'évacuation des eaux pluviales et conduire à des inondations aux points bas.

cf. schéma infra sur Nîmes

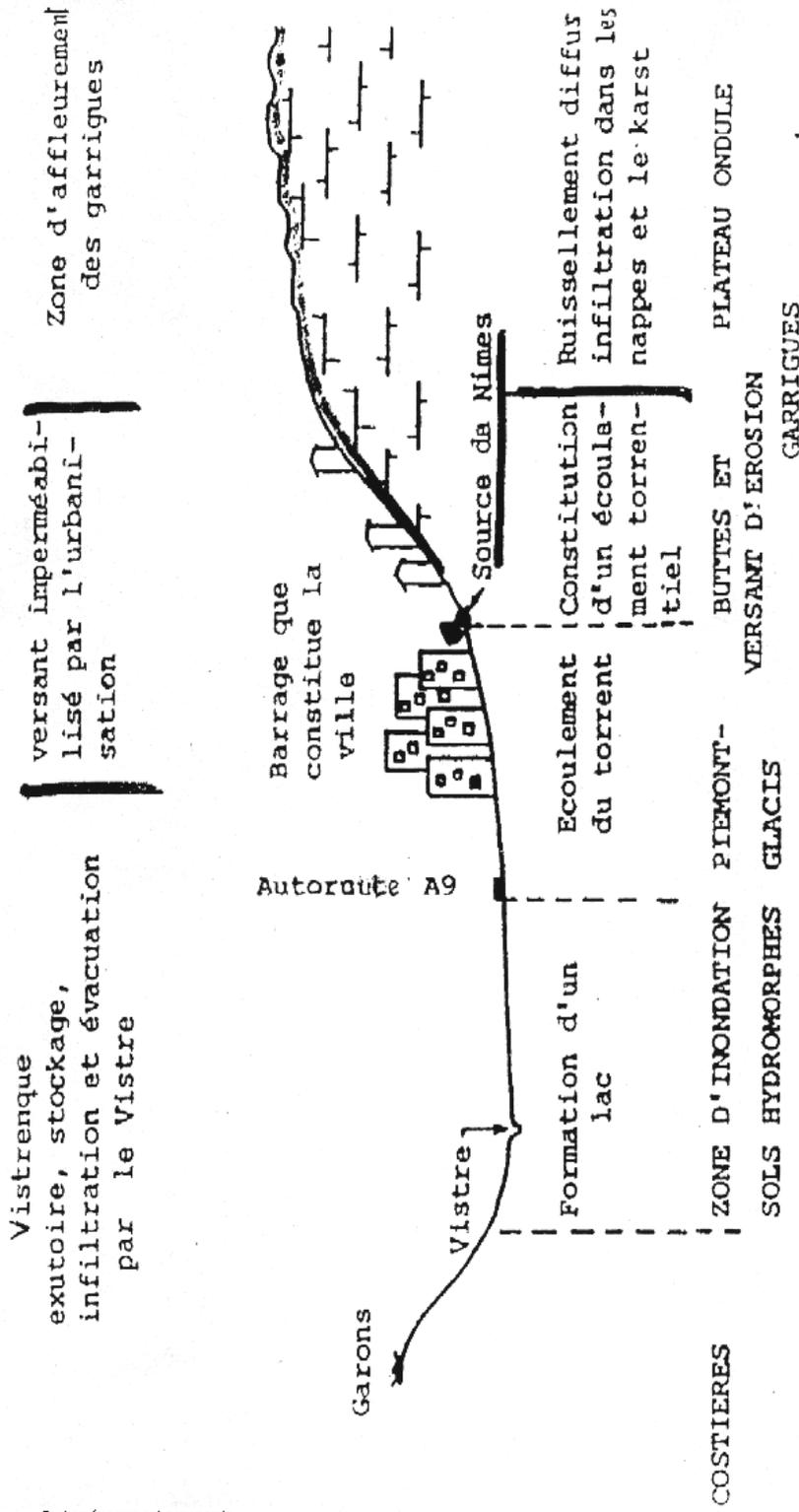
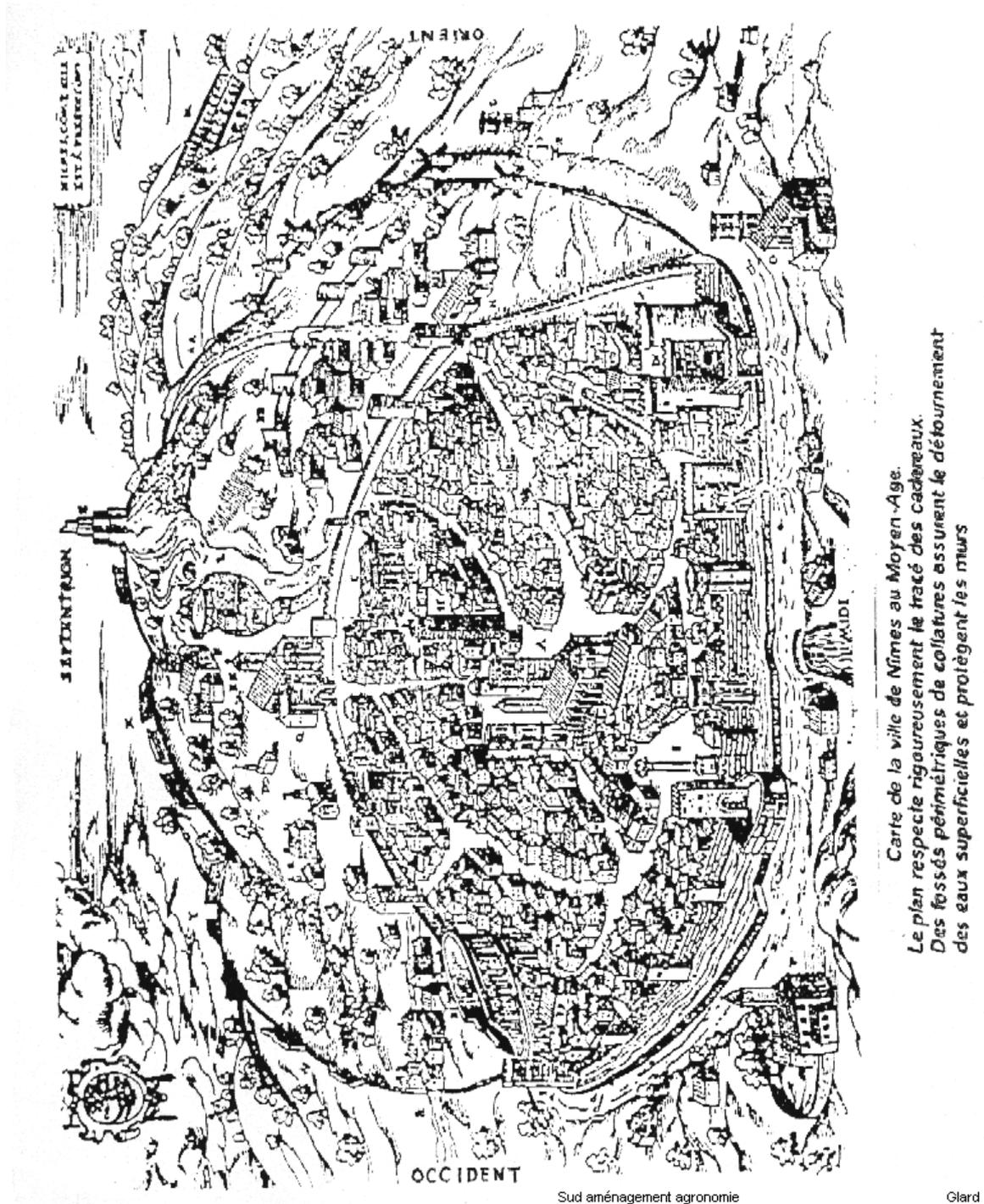


Schéma du fonctionnement hydrologique de la région

nîmoise

N.B. Il semblerait que dans les temps médiévaux, les anciens avaient déjà compris le principe de l'écoulement des eaux superficielles, si l'on en juge par le plan infra datant du XVème siècle.



• Par crues **torrentielles** : Ce phénomène se rencontre dans les zones montagneuses, mais aussi sur les rivières par des pluies de grande intensité, de type cévenole, par exemple le débordement de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine, le 2 sept. 1992 où il tomba 154 mm en 3 heures.

Cf. figure  
ci-contre



- Par **submersion** des zones littorales ou lacustres, liée à la présence de facteurs anormaux (raz de marée, tempête). En nov. 1999, l'Aude ne pouvait plus se déverser facilement dans la mer et cela aggrava l'inondation due, à l'origine, à des pluies paroxystiques.

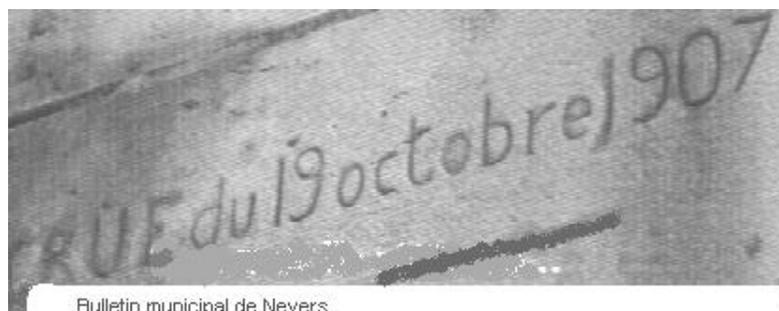
- Par **cyclones** (dépressions tropicales) avec des précipitations pouvant atteindre jusqu'à 2 m / 24 heures et conduisant à des crues violentes.

- Par **destructions** d'ouvrage : digue, levée, barrage.

En 1943, les bombardiers anglais avec des bombes torpille lancées dans le lac de retenue, firent sauter un barrage sur la Ruhr, dont la vague déferlante causa de nombreuses victimes allemandes

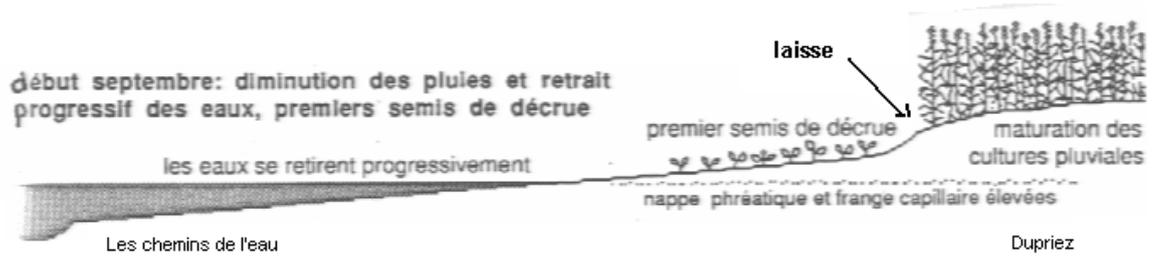
**545. 3 La laisse d'inondation correspond à la trace laissée par le niveau des eaux les plus hautes.**

Dans le croquis ci-contre le trait indique la hauteur maximum atteinte par la Loire à Nevers lors de la crue mémorable d'oct1907



Les dégradations subséquentes restent fonction de la hauteur de submersion et de la vitesse d'écoulement de l'eau.

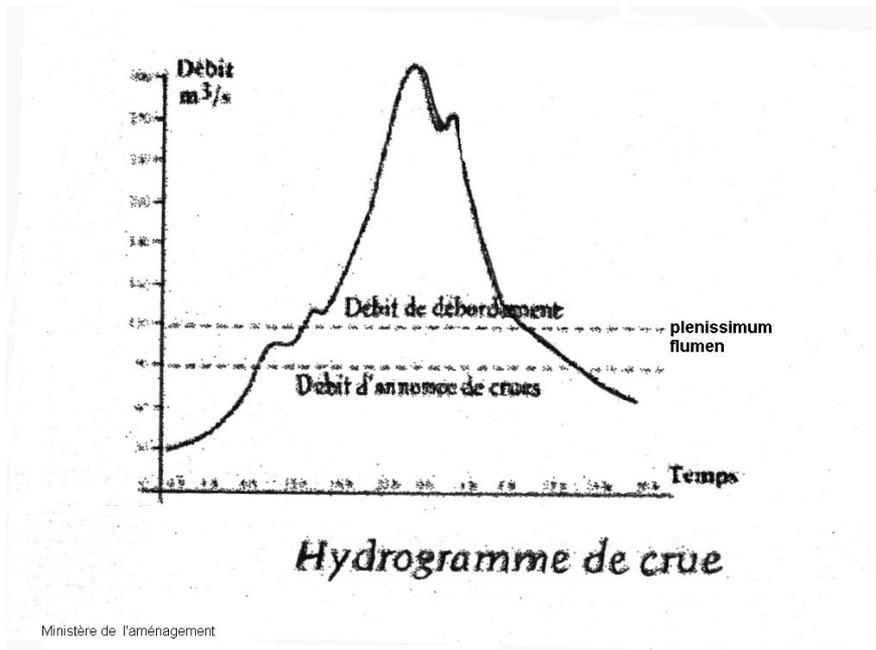
Sur la figure *infra*, en Afrique la laisse indique la limite entre la zone à cultures pluviales et la zone à cultures de décrues.



## 54. 6 Paramètres d'une crue

L'augmentation de débit d'un cours d'eau entraîne celle de la vitesse d'écoulement d'eau et de la hauteur du plan d'eau au point considéré.

### 546.1 La courbe des débits en un point s'appelle hydrogramme



cf. graphique ci-contre

### 546. 2 Analyse fréquentielle des crues.

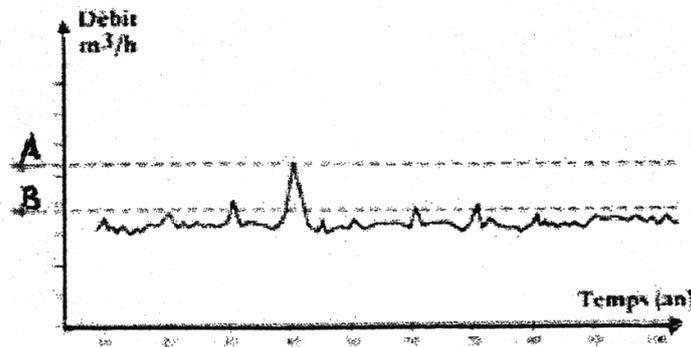
Avec la formule de Caquot, comme avec celle de Turazza, la **fréquence de la crue** est celle qui correspond à la **fréquence des averses** représentée par la courbe des intensités critiques ou de projet.

$$i = a (t_p)^n$$

Pour les stations où les observations pluviographiques s'étendent sur une durée suffisante, il est possible d'établir une famille de courbes pour des averses de fréquence décennale (10 ans) duodécennale (20) trentenaire, cinquantaire, jusqu'à centenaire dans quelques cas (Paris notamment).

Pratiquement, la fréquence à adopter pour les calculs dépend de l'ouvrage auquel ceux-ci sont destinés. Généralement on utilise la fréquence décennale pour les travaux d'assainissement en terre et autres ouvrages pouvant sans trop de dommages, supporter de telles crues.

On appelle crue centenaire : une crue qui, chaque année, présente une chance sur cent de se produire (voir niveau A infra). On appelle crue trentenaire une crue qui chaque année a une chance sur trente de se produire (voir niveau B infra).



### Fréquence des crues

Ministère de l'aménagement

La fréquence jubilaire (25 ans) est réservée à de petits barrages et autres ouvrages importants prévus pour une plus longue durée. En fait, c'est essentiellement **l'appréciation du chargé de l'étude** qui interviendra, complétée par la longueur effective des observations disponibles.

#### 546. 3 Théorie du calcul des crues

A partir des observations très nombreuses effectuées aux U.S.A. Fuller avait établi une formule donnant le débit  $Q$  pour une fréquence donnée "  $t$  " dans un bassin de rivière.

$$Q_t = (1 + \beta \log t) \left\{ \frac{S^{0,8}}{3} + \frac{8}{300} S^{0,5} \right\} \bullet 4 N$$

$S$  : coefficient variant de 80 à 100 suivant que l'on a affaire à une plaine ou à un bassin montagneux.

Cette formule reste peu applicable en France MAIS elle permet de connaître le débit probable  $Q_t$  lorsqu'on connaît un débit  $Q'_t$  donné selon la formule.

$$Q_t = Q'_t (1 + \beta \log t)$$

Aux Etats-Unis Fuller prenait  $\beta = 0,8$ . En France, suivant Coutagne  $\beta$  peut être pris égal à 1. donc

$$Q_t = Q'_t (1 + \log t) \quad (1)$$

•Application aux **Roubion et Jabron** à Montélimar :

Les formules de Caquot et de Turrazza fournissent le débit décennal  $Q_{10}$  à partir de là en utilisant ( 1 )

$$\text{crue annuelle} = 0,5 Q_{10}$$

$$\text{crue duodécennale} = 1,15 Q_{10}$$

$$\text{crue cinquantenaire} = 1,35 Q_{10}$$

$$\text{crue centenaire} = 1,5 Q_{10}$$

A partir d'une crue décennale  $Q_{10}$  Monsieur Vivas a ainsi estimé la crue duodécennale du Roubion + Jabron à Montélimar à .....  $550 \text{ m}^3 / \text{s}$  et la crue cinquantenaire à .....  $650 \text{ m}^3 / \text{s}$ .

Il faut se garder de réviser les coefficients après une catastrophe comme ce fut le cas pour la Durance en 1873 et 1876, car l'on tombe dans l'exagération des débits.

#### 546. 4 Mesure de crues

L'on trouvera sur une période jubilaire (25 ans) les valeurs observées au limnigraphe de Souspierre sur le Jabron.  
Cf. tableau *infra*

**Le Jabron à SOUSPIERRE (V4455010)**

**Etude des crues - Valeurs observées**

Période	Maxima journaliers (m3/s) 2 valeurs par période		Maxima instantanés (m3/s) 2 valeurs par période	
	Sep1967 - Aug1968	2.68	0.707	6.80
Sep1968 - Aug1969	6.73	4.73	29.5	12.1
Sep1969 - Aug1970	7.73	5.85	45.1	11.2
Sep1970 - Aug1971	16.0	5.81	41.6	16.5
Sep1971 - Aug1972	13.4	2.24	20.1	2.34
Sep1972 - Aug1973	6.72	1.55	9.58	2.34
Sep1973 - Aug1974	4.46	2.88	7.29	3.00
Sep1974 - Aug1975	6.57	3.27	33.6	3.70
Sep1975 - Aug1976	8.81	6.18	20.1	9.78
Sep1976 - Aug1977	28.6	12.2	46.5	28.1
Sep1977 - Aug1978	10.9	9.98	27.2	25.5
Sep1978 - Aug1979	4.81	1.27	5.92	5.25
Sep1979 - Aug1980	6.68	3.29	24.4	6.37
Sep1980 - Aug1981	1.60	1.40	2.24	1.93
Sep1981 - Aug1982	4.90	1.82	14.6	8.93
Sep1982 - Aug1983	11.8	9.45	22.1	19.5
Sep1983 - Aug1984	4.85	2.95	14.9	11.4
Sep1984 - Aug1985	14.6	4.78	18.8	8.77
Sep1985 - Aug1986	16.0	8.16	26.4	14.9
Sep1986 - Aug1987	8.39	2.07	15.3	4.32
Sep1987 - Aug1988	6.12	4.31	11.4	9.67
Sep1988 - Aug1989	6.50	3.52	21.0	5.78
Sep1989 - Aug1990	0.350	0.332	1.01	0.837
Sep1990 - Aug1991	11.6	3.87	16.7	15.6
Sep1991 - Aug1992	3.97	3.04	12.4	9.47
Sep1992 - Aug1993	11.5	4.77	13.5	10.2

Diren

Valence

Sur le tableau *infra* indiquant les crues biennales, quinquennales et décennales, l'on peut lire les débits de crues instantanées et journalières.

### Débits de crues

Valeurs calculées selon une loi de Gumbel (méthode du maximum de vraisemblance)  
<intervalle de confiance à 90%> Période de calcul : September à August

m3/s	Nbre ans	Biennale		Quinquennale			Décennale			Gradex	X0	
Journalières	26	<6.05>	<b>7.75</b>	<9.98>	<10.1>	<b>12.4</b>	<16.7>	<12.5>	<b>15.6</b>	<21.4>	<b>4.14</b>	<b>6.23</b>
Instantanées	26	<14.0>	<b>17.5</b>	<22.2>	<23.5>	<b>28.5</b>	<37.4>	<29.3>	<b>35.7</b>	<48.0>	<b>9.69</b>	<b>13.9</b>

**Débit maximum journalier publié : 28.6 m3/s**  
**Débit maximum instantané publié : 84.0 m3/s**

Diren

Valence

#### 546.5 Ecoulement des crues

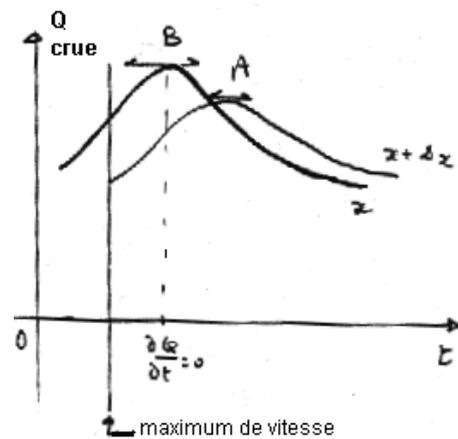
Le débit maximum décroît lorsqu'on se dirige vers l'aval donc de B (point maximum avec  $\frac{dQ}{dt} = 0$ ) vers A, dt

mais  $Q = u \cdot \omega$        $u =$  vitesse de l'eau     $\omega =$  section mouillée  
dérivons                       $\underline{du} = \underline{dQ} - \underline{d\omega}$   
dt dt dt

le maximum de vitesse se situe au point où  $\underline{du} = 0$   
dt

donc à gauche de B

cf. graphique ci-contre



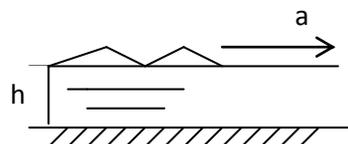
Enseeiht

Etienne

- La **vitesse de propagation d'une onde** sur une eau immobile de profondeur constante h est  $a = \sqrt{gh}$

l'onde se propage de façon sinusoïdale.

cf. croquis ci-contre



La célérité absolue d'une onde de crue c se propageant sur un courant liquide de profondeur h animé lui-même d'une vitesse moyenne V s'écrit :  $c = V + a$

- La **prévision d'arrivée** de l'onde de crue

à une distance x :  $Q = f(h) \sqrt{i}$

avec  $h$  : hauteur d'eau,  $i$  : pente de l'eau :  $\frac{h(x) - h(x+dx)}{dx}$

à une distance x + dx :  $Q(x,t) = r(h,t) + \rho(x,t)$

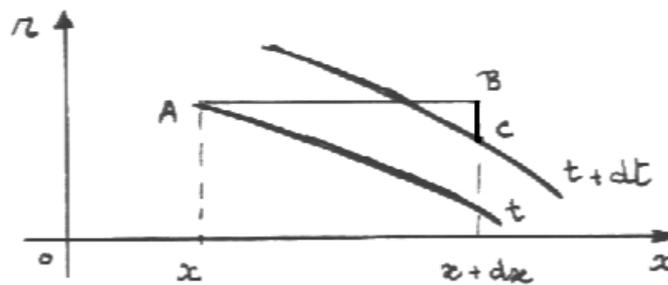
peut

avec

$\rho(x,t)$  = débit complémentaire dû à la variation de  $i$ , il  
parfois dans certains cas atténuer la crue  
 $r(h,t)$  = débit ordinaire avec  $r = k \cdot h^n$

Sur le graphique ci-contre  
l'atténuation de la crue  
correspondra à BC

L'atténuation de  
la crue augmentera  
si la hauteur et la  
rugosité augmentent  
et si la pente diminue.



Enseeieht

Etienne

## 55 Débit d'étiage

Die Menschen dagegen, die vom und im Fluss leben,  
Sterben wenn die Ströme versiegen<sup>55</sup>

K. Theweleit

Le mot étiage provient de "étier" terme dialectal désignant un chenal reliant la mer au marais salant (le remplissant à la marée haute et le vidant à la marée basse). Il possède la même origine que le mot estuaire, du latin *aestuarium-i*, lui-même dérivé de *oestus - i* : la marée.

Comme l'indique le texte en épigraphe de Theweleit, l'étiage et son corollaire, le tarissement, peuvent entraîner de graves conséquences.

### 55.1 Définitions

#### 551.1 Littéraire

Débit exceptionnellement faible d'un cours d'eau, qu'il ne faut pas confondre avec les basses eaux saisonnières habituelles, même s'il en est l'exacerbation.

Voir figure ci-contre  
l'étiage du Niger.



#### 551. 2 Statisticienne

La définition statisticienne la plus usuelle correspond au DCE, Débit Caractéristique d'Etiage, calculé sur une longue série (plusieurs années) de débits journaliers classés, débit au-dessous duquel l'écoulement descend DIX jours/an.

#### 55.2 Amplitude des étiages

<sup>55</sup> Les hommes par contre, qui vivent du fleuve, meurent quand son courant se tarit

### 552.1 A l'échelle européenne

Les débits caractéristiques d'étiage, par unité de surface, présentent des minima très différents selon les cours d'eau.

Régime glaciaire	: Arve 5 l/s/km <sup>2</sup>
Régime méditerranéen	: Jabron 1,87 l/s/km <sup>2</sup>
Régime pluvial océanique	: Moselle 0,5 l/s/km <sup>2</sup>

Le chiffre s'avère d'autant plus faible que les réserves souterraines le sont aussi.

### 552.2 A l'échelle mondiale

Pour certains fleuves, toute leur eau se perd en route (par évaporation, infiltration, irrigation). Ainsi le Syr-Daria au Kazakhstan n'atteint pas chaque année la mer d'Aral.

## 55. 3 Le tarissement

### 553.1 Définition

Le tarissement peut être considéré comme la décroissance des débits correspondant à la vidange des réserves en dehors de toute précipitation, en période non influencée et à température constante.

### 553. 2 Loi de Maillet

Au début du siècle, l'ingénieur des Ponts et Chaussées Maillet a estimé que la vidange d'un réservoir naturel pouvait s'assimiler à celle d'un corps poreux et s'exprimer par une équation exponentielle décroissante du type :

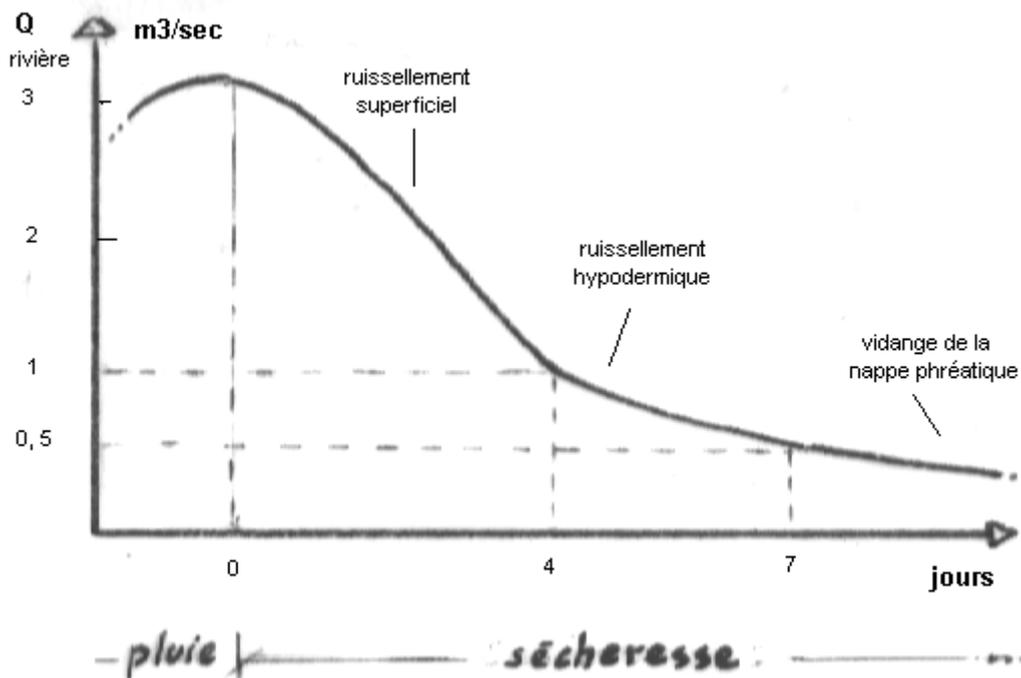
$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

Q<sub>0</sub> : débit à l'instant initial  
 tarissement

Q<sub>t</sub> : débit au bout de t jours

α: coefficient de

Dans le cas où t<sub>p</sub> < t<sub>r</sub> temps de pluie inférieur au temps de ruissellement, il vient la courbe  
 Le



Ecole polytechnique Lausanne

Musy

coefficient α caractérise la disposition d'une rivière à se ressuyer plus ou moins rapidement :

plus  $\alpha$  est faible, plus le tarissement est lent.

Cette loi de Maillet montre qu'à l'exception du ruissellement superficiel pour lequel trop de paramètres entrent en jeu, on parvient à démontrer une certaine constance dans le coefficient de tarissement  $\alpha$ , constance qui traduit la pérennité du rôle du cadre géographique de ce bassin-versant.

● **Intérêt de la loi de Maillet en recherche hydrologique**

Les phases de décrue et de tarissement restent les plus favorables pour individualiser les trois apports :

- le ruissellement
- L'écoulement hypodermique (ressuyage)
- la vidange des nappes pour soutenir l'étiage

Les courbes obtenues permettent en particulier, de connaître la géologie la morphométrie du bassin-versant, d'identifier et de caractériser les différents types de nappes (précaires ou non) qui alimentent en période de sécheresse les cours d'eau.

• Détermination de la capacité d'emmagasinement du bassin-versant : Si la loi de tarissement fonction (temps) du bassin-versant est connue, on évalue sa capacité d'emmagasinement par son intégration sur l'intervalle de temps  $(t, \infty)$ , la nappe est vidangée si  $t = \infty$ .

Le volume d'eau disponible est alors donné par  $V = \int_t^\infty Q_t dt$  au temps  $t$

En prenant  $t = 0$  comme origine des temps avec un débit mesuré  $Q_0$ , il vient

$$V = \int_0^\infty Q_t dt = Q_0 \int_0^\infty e^{-\alpha t} dt \quad (\text{loi de Maillet})$$

En intégrant  $V = Q_0 \left[ -\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} \right]_0^\infty$  mais  $e^0 = 1$  et  $e^{-\infty} = 0$

$\alpha$

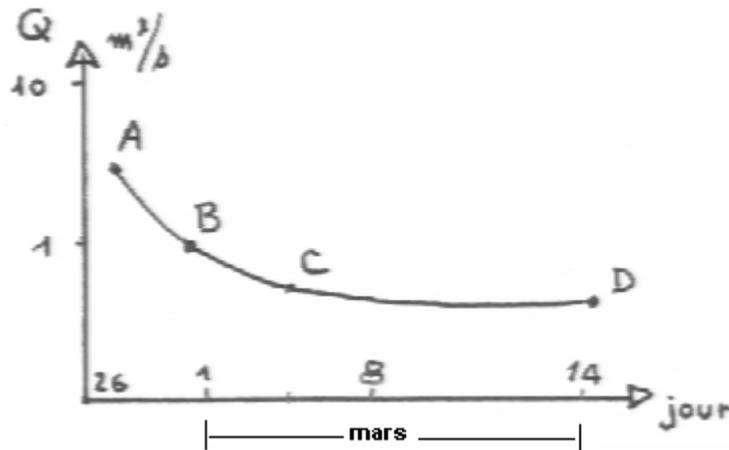
et  $V = \frac{Q_0}{\alpha}$  volume utile d'eau de la nappe au temps choisi  $t = 0$

● **Application de la loi de Maillet au tarissement de l'Envigne :**

Il s'agit d'un affluent de la rive gauche de la Vienne qui débouche à Chatelleraut, son bassin-versant se monte à 240 km<sup>2</sup>, il s'étend aux confins du bassin parisien et du seuil du Poitou, il s'inscrit dans la sédimentation crétacé (sables et marnes du Cénomaniens) avec éléments sidérolithiques du massif central.

Son système de tarissement s'avère complexe car il dépend de plusieurs nappes. entre le 26 fév. et le 14 mars 1973 la décrue et le tarissement apparaissent sur le graphique infra.

L'ordonnée est comptée en coordonnée logarithmique



Cahiers - sécheresse

Dacharry

le segment AB traduit la décrue du ruissellement superficiel avec  $\alpha = -0,39$  ce qui indique une décrue rapide

le segment BC traduit la décrue du ruissellement hypodermique  $\alpha = -0,08$  ce qui marque une décrue lente

le segment CD traduit la vidange des nappes avec  $\alpha = -0,02$  ce qui montre un tarissement très lent.

En fait, décrues et tarissements restent irréguliers : les segments ne sont pas des droites et chaque vidange n'est que l'approximation d'une fonction exponentielle décroissante. Les données ne représentent pas des valeurs instantanées mais une suite de moyennes journalières dont la distribution n'est pas forcément exponentielle. Ces mesures furent réalisées par un limnigraphe à flotteur à la sensibilité devient médiocre dès qu'il s'agit de faibles débits comme l'écoulement de base de la rivière

• **Application de la loi de Maillet au tarissement du Roubion**

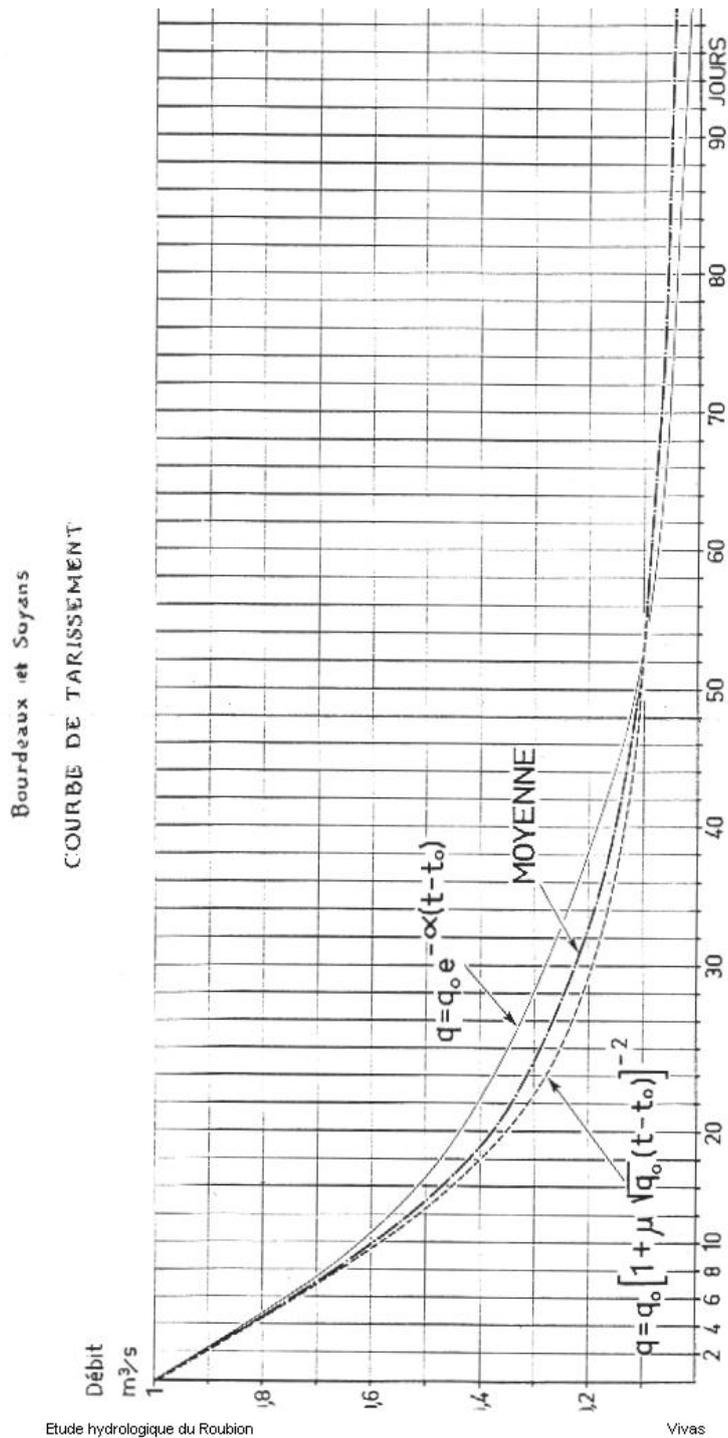
A partir de mesures de débits journaliers à Soyans et à Bourdeaux, du jour où le niveau de la rivière commence à baisser jusqu'au jour où il commence à remonter, la température étant réputée constante et la

A partir de mesures de débits journaliers à Soyans et à Bourdeaux, du jour où le niveau de la rivière commence à baisser jusqu'au jour où il commence à remonter, la température étant réputée constante et la sécheresse absolue, les courbes construites ne correspondent pas exactement à la courbe théorique de Maillet. Les chiffres ont été obtenus ainsi :

	$t_0 = 0 \text{ j}$	$t = 52 \text{ j}$
	$q_0 = 1 \text{ m}^3/\text{s}$	$q = 0,105 \text{ m}^3/\text{s}$
d'où	$\alpha = 0,0433$	$\mu = 0,0401$

donc la courbe de tarissement s'écrit  $\rightarrow q = e^{-0,0433 t}$

Cf. graphique ci-contre



**553. 3 Mesures de débit d'étiages**

● **sur le bassin de l'Oubangui**

A partir des jaugeages effectués par l'ORSTOM, il a été possible, à partir de 15 étiages annuels (parfois plus) d'établir le tableau de la distribution statistique des étiages et en particulier leur date d'apparition. Certaines stations (celles de l'Oubangui, de la Ouaka) ont une période de basses eaux bien déterminée, tandis que d'autres (Lobaye, Tomi, Mbali)) présentent des étiages s'étalant sur près de 5 mois.

Cf. tableau *infra*.

***Dates d'apparition des étiages maximaux annuels***

Rivière	station	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin

					1-10	11-20	21-31	1-10	11-20	21-30	1-10	11-20	21-31	1-10	11-20	21-30
--	--	--	--	--	------	-------	-------	------	-------	-------	------	-------	-------	------	-------	-------

### Oubangui supérieur

Mbomou		Zémio	2	<sup>3</sup>	3	3	3	2	3		2					
		Bangassou	2	<sup>1</sup>	1	3	1	3	1	1						
Mbokou		Obo		<sup>1</sup>	1	2	1		2							
Kéré		Kéré						1	1							
Ouara		Dembia		<sup>3</sup>	1	4		2	1							
Chinko		Rafaï		<sup>1</sup>	3	4	3	3	2	1			1			
Mbazi		Loungouba	2	<sup>1</sup>			2	2					1			

### Moyen Oubangui

Oubangui		Mobaye		<sup>2</sup>	5	4	5	1	1							
		Bangui	1	<sup>4</sup>	13	14	13	8	6	2	1					
		Zinga	2	<sup>3</sup>	5	3	4	4	2							

### Affluents de l'Oubangui

Ouaka		Banbazi			2	7	2	2	3	2						
Tomi		Sibut		<sup>1</sup>	1	1	5		2	2	2		2	1		
Mbomou		Zémio	2	<sup>3</sup>	3	3	3	2	3		2					
Mbali		Boali	1			2	6	2	7	4	5	2	1	1		
Lobaye		Kendigué-Y		<sup>3</sup>		1	3	1		1				1		

Dans le cas du tributaire Mbomou à Zémio, les paramètres infra décrivent la situation hydrologique :

- superficie du bassin-versant : 27 700 km<sup>2</sup>
- nombre d'années d'observation : 11
- valeur moyenne des débits minimaux annuels : 27 m<sup>3</sup>/s  
( écart type : <sup>+</sup> 13,3 m<sup>3</sup>/s )
- coefficient de variation : 0,493
- débit spécifique de l'étiage médian : 0,90 l/s/km<sup>2</sup>
- débit spécifique de l'étiage décennal : 0,44.l/s/km<sup>2</sup>
- coefficient de tarissement : 0,0232

le coefficient de tarissement indique la vitesse de la décrue.

#### • sur le bassin du Jabron (à Souspierre)

Le tableau infra, fondé sur le calcul statistique, après 28 années de durée de mesures indique : un débit d'étiage décennale de 0,129 m<sup>3</sup>/s

### Débits d'étiage du Jabron

Période de calcul : January à December

m3/s	Nbre ans	Valeurs calculées selon une loi de Galton <intervalle de confiance à 90%>									Fréquences expérimentales		
		Biennale sèche			Quinquennale sèche			Décennale sèche			Bien.	Quinq.	Décen.
QMNA	28	<0.173>	<b>0.192</b>	<0.212>	<0.130>	<b>0.148</b>	<0.164>	<0.110>	<b>0.129</b>	<0.145>	<b>0.190</b>	<b>0.157</b>	<b>0.120</b>
VCN10	28	<0.147>	<b>0.162</b>	<0.179>	<0.110>	<b>0.126</b>	<0.139>	<0.094>	<b>0.110</b>	<0.123>	<b>0.162</b>	<b>0.126</b>	<b>0.103</b>
VCN30	28	<0.163>	<b>0.180</b>	<0.200>	<0.122>	<b>0.139</b>	<0.154>	<0.103>	<b>0.121</b>	<0.136>	<b>0.183</b>	<b>0.140</b>	<b>0.116</b>
QCN10	28	<0.157>	<b>0.174</b>	<0.191>	<0.119>	<b>0.135</b>	<0.149>	<0.101>	<b>0.118</b>	<0.132>	<b>0.173</b>	<b>0.136</b>	<b>0.112</b>
QCN30	28	<0.202>	<b>0.226</b>	<0.253>	<0.147>	<b>0.170</b>	<0.190>	<0.123>	<b>0.146</b>	<0.166>	<b>0.228</b>	<b>0.172</b>	<b>0.150</b>

Diren

Débit de référence d'étiage (QMNA5) : 0.148 m3/s (1.7 l/s/km<sup>2</sup>) soit 18% du module

Valence

Avec les définitions suivantes :

QMNA<sub>5</sub> : débit moyen le plus faible , de fréquence quinquennale

VCN<sub>10</sub> : débit moyen minimal annuel sur 10 jours ( débit non dépassé durant 10 jours consécutifs)

VCN<sub>30</sub> : débit moyen minimal annuel sur 30 jours

QCN<sub>10</sub> : débit moyen du mois le plus faible sur une période de 10 jours , une année donnée

Il s'avère également intéressant de connaître les valeurs observées sur ce même cours d'eau sur une durée de mesures de 31 ans.

Voir tableau *infra*

### Le Jabron à SOUSPIERRE (V4455010)

#### Etude des étiages - Valeurs observées

Période	QMNA (m3/s)	VCN10 (m3/s)	VCN30 (m3/s)	QCN10 (m3/s)	QCN30 (m3/s)
Jan1967 - Dec1967	0.268	0.204	0.256	0.220	0.280
Jan1968 - Dec1968	0.189	0.155	0.169	0.170	0.222
Jan1969 - Dec1969	0.257	0.231	0.246	0.236	0.278
Jan1970 - Dec1970	0.243	0.206	0.237	0.227	0.329
Jan1971 - Dec1971	0.190	0.175	0.182	0.176	0.194
Jan1972 - Dec1972	0.219	0.176	0.201	0.181	0.356
Jan1973 - Dec1973	0.124	0.102	0.116	0.109	0.167
Jan1974 - Dec1974	0.116	0.102	0.111	0.111	0.151
Jan1975 - Dec1975	0.219	0.176	0.205	0.201	0.370
Jan1976 - Dec1976	0.272	0.252	0.265	0.265	0.325
Jan1977 - Dec1977	0.355	0.279	0.313	0.304	0.388
Jan1978 - Dec1978	0.244	0.235	0.239	0.245	0.253
Jan1979 - Dec1979	0.172	0.153	0.172	0.169	0.218
Jan1980 - Dec1980	0.171	0.148	0.159	0.158	0.179
Jan1981 - Dec1981	0.171	0.146	0.154	0.155	0.172
Jan1982 - Dec1982	0.157	0.119	0.140	0.136	0.219
Jan1983 - Dec1983	0.221	0.194	0.204	0.201	0.234
Jan1984 - Dec1984	0.248	0.212	0.225	0.227	0.265
Jan1985 - Dec1985	0.162	0.150	0.156	0.150	0.174
Jan1986 - Dec1986	0.182	0.164	0.177	0.166	0.218
Jan1987 - Dec1987	0.186	0.142	0.185	0.156	0.212
Jan1988 - Dec1988	0.261	0.212	0.231	0.219	0.298
Jan1989 - Dec1989	0.119	0.108	0.119	0.116	0.143
Jan1990 - Dec1990	0.084	0.073	0.076	0.077	0.086
Jan1991 - Dec1991	0.157	0.126	0.134	0.136	0.150
Jan1992 - Dec1992	0.238	0.159	0.235	0.200	0.319
Jan1995 - Dec1995	0.187	0.159	0.180	0.166	0.234
Jan1998 - Dec1998	0.200	0.181	0.194	0.187	0.234

Diren

Valence

#### 553. 4 Zones homogènes de drainage du Jabron

Les campagnes de jaugeage en basses eaux permettent d'effectuer une investigation spatiale des écoulements à l'intérieur des bassins et d'élaborer des profils hydrologiques des différents cours d'eau qui servent à la détermination des "zones de rendement homogène".

Ces dites zones sont définies par le truchement de la densité de drainage, définie comme la longueur totale des cours d'eau de tous ordres contenus dans une superficie A du bassin-versant du Jabron :

$$d = \frac{\sum L_x}{A}$$

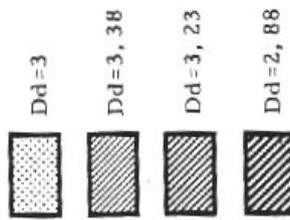
Autour de Dieulefit, la capacité de rétention donne : densité de drainage = 2,88 ,

En amont à Souspierre, la capacité de rétention baisse (source) : densité de drainage = 3,38 ,

En aval de Souspierre, substratum caillouteux, nappe alluviale : densité spécifique = 3

BASSIN DU JABRON  
**PRINCIPALES ZONES HOMOGÈNES**

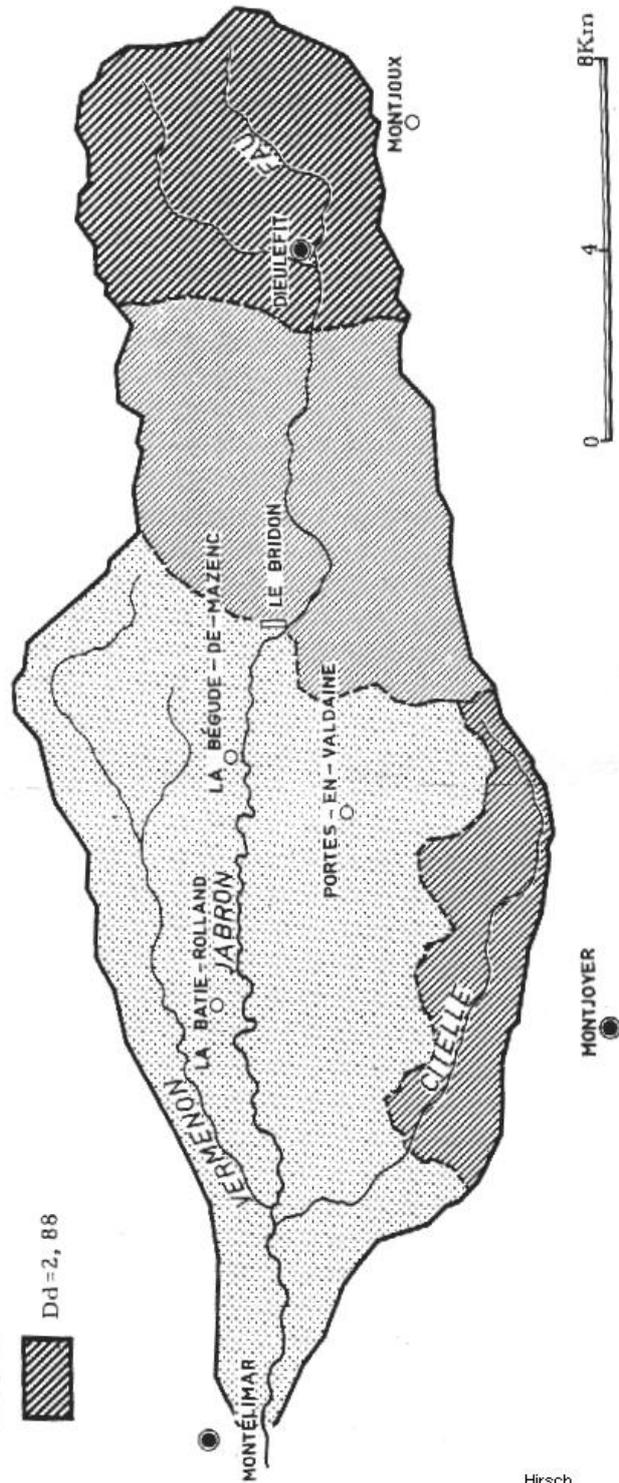
ZONES HOMOGÈNES et densités de drainage cumulées depuis l'amont



- Station pluviométrique utilisée
- Station pluviométrique récente
- Limnigraphe de Souspierre ( le Bndon )

Cf. carte infra

● BOURDEAUX



Etude du bassin du Jabron

Hirsch

**553. 5 Sécheresse**

La sécheresse constitue une déficience exceptionnelle ( définie par rapport à une valeur critique) des apports d'eau par les pluies.

Il existe des périodes, des années, des décennies sèches : ainsi 1 mois sans pluie en Bretagne = sécheresse mais 8 mois, sans pluie à Niamey (Niger) s'avère normal.

## 56 Débit solide

### 56.1 Etymologie

Débit<sup>56</sup>, dans le sens utilisé ici, vient de débiter (écouler et non débiter en morceaux)

### 56.2 Définition

Masse de matériaux solides traversant une section transversale donnée d'un cours d'eau par unité de temps.

Quand leur vitesse se ralentit les eaux déposent ces alluvions dans les plaines et les deltas, puis dans les océans. Le Nil dépose 30 cm / siècle dans son lit majeur et environ 16 cm /siècle dans son lit mineur.

Plus prosaïquement les égouts s'ensablent par dépôt.

Cf. dessin infra



Mémento des eaux pluviales

service technique urbanisme

## 56. 3 Types de transport

### 563.1 Matériaux en solution

Ils proviennent de l'érosion chimique des bassins-versants, des pollutions anthropiques et atmosphériques.

Les ions et le CO<sub>2</sub> représentent 59 millions de tonnes/an pour le Mékong.

### 563.2 Matériaux en suspension

Les petits grains d'eau sont remplacés par des petits grains d'argile et de sable. Cela détermine la concentration ou masse solide/ unité de volume ( de l'ordre de 20 g / litre)

### 563.3 Matériaux de charriage

Le charriage de fond correspond aux matériaux résidants dans le fond du cours d'eau ( sables, galets ...) qui , à l'occasion de phénomènes hydrologiques importants ( crue, chasse de barrage....) peuvent être entraînés par les eaux.

Dans la majorité des cas les matériaux de charriage occupent une faible importance par rapport aux matériaux en suspension, 10 % environ.

## 56.4 Amplitude des transports à l'échelle terrestre

### 564.1 Sédiments

Mékong : 160 millions de tonnes / an

Orénoque : 210 millions de tonnes / an

<sup>56</sup> Au XVIIIème siècle on désignait le débit par "dépende d'eau"

### 564.2 Erosion mécanique moyenne des sols

Elle arrache par millénaire :

En Asie : 0,152 mètre

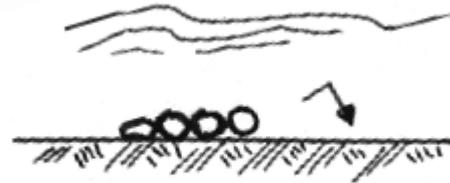
Dans le bassin du Rhône : 0,040 mètre

### 56.5 Suspension

#### 565.1 Phénomène

Si la vitesse du courant devient nulle, les sables tombent au fond. Quand les sables et les petits grains se trouvent au fond, il existera une vitesse critique qui les entraînera par charriage d'abord, puis les grains sauteront : il s'agit de la saltation

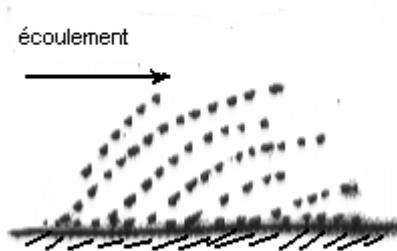
voir croquis ci-contre



Enseeiht

Etienne

#### Suspension totale



CNFPT Midi Pyrénées

Bouloc

et enfin ils reviendront en suspension  
voir croquis ci-contre

Tout cela de façon discontinue : une particule du lit restera immobile puis se déplacera (charriage) puis s'arrêtera, puis pratiquera la saltation etc..... tout ceci en fonction de la vitesse du courant

si  $v < 0,30$  m / s l'on constate un dépôt

si  $v > 2$  m / s l'on constate l'entraînement

#### 565.2 Théorie

Le paramètre fondamental reste la concentration qui atteint environ 20 g / litre, les particules présentant une dimension de 0,1 mm.

Le mélange sable + eau donne des résultats différents d'avec le mélange sable + eau + argile. Ceci en raison de la viscosité augmentée par la présence de fines particules argileuses.

• Régimes hydrauliques : Il en existe deux : le régime laminaire et le régime turbulent.

Le régime laminaire ( **fluvial** ) a une vitesse constante en grandeur et direction, il donne une image transparente \_\_\_\_\_

Le régime turbulent ( **torrentiel** ) n'a pas une vitesse constante, il donne une image brouillée





• **Action de la viscosité** et nombre de Reynolds : La viscosité augmente si la température augmente et si la viscosité augmente la turbulence baisse.

La vitesse de chute  $w$  du grain s'exprime ainsi en fonction du diamètre  $d$ <sup>57</sup> du grain

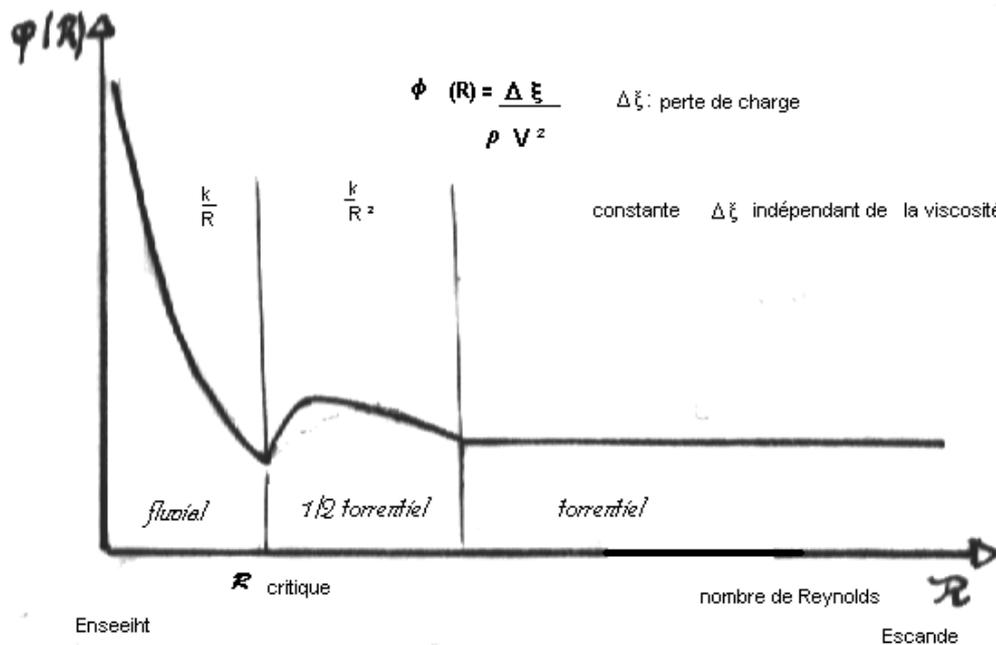
$$w = k \cdot d^2 \quad (\text{régime fluvial}) \quad R < 1$$

$$w = k \sqrt{d} \quad (\text{régime torrentiel}) \quad R > 1\,000$$



$R$  : nombre de **Reynolds** caractérise la **viscosité**  $\eta v$ ,  $R = \frac{Vd}{\nu}$   $V$  : vitesse de l'eau  $d$  : diamètre grain

$\nu$   
 L'huile présente une viscosité 100 fois supérieure à celle de l'eau,  
 rest un nombre sans dimension  $[R] = 0$   
 pour  $R$  petit  $\nu$  intervient comme étouffeur de tourbillons  
 pour  $R$  grand  $\nu$  ne présente guère d'importance



Entre 0,1 mm et 2 mm de diamètre des grains l'on se situe entre le régime laminaire et turbulent;

Il faut noter que si la particule n'est pas sphérique elle choit en feuille morte en opposant son maître-couple à la chute.

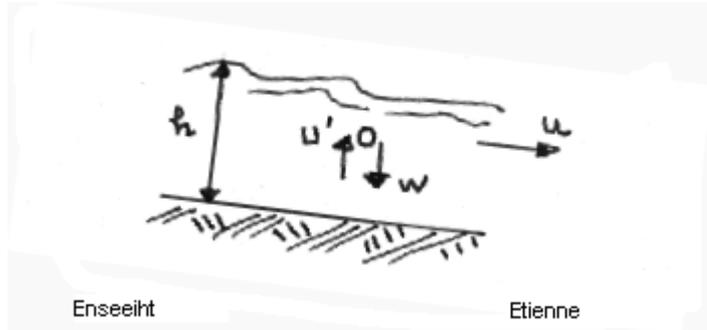
• **Répartition de la concentration** : elle reste liée à la turbulence, en effet le grain sous l'action de la gravité devrait choir au fond avec une vitesse  $w$ , mais une force de turbulence le fait remonter à une vitesse  $u'$  de façon qu'il se déplace horizontalement :

<sup>57</sup>  $d$  est une dimension linéaire caractéristique du phénomène étudié, pour un évacuateur de crues  $d$  = hauteur au-dessus du fond en ce cas il faut  $R < 2\,400$  pour le laminaire et  $R > 12\,000$  pour le turbulent

$$u' = \frac{1}{m} \cdot u \quad (u : \text{vitesse du courant})$$

et  $m_c$  ( critique) =  $6 + 2,3 \cdot h$  ( h en mètres)

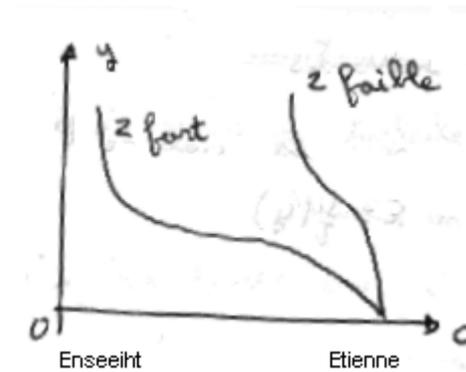
cf. croquis ci-contre



La concentration augmentera si l'on se situe à une plus grande profondeur avec des matériaux lourds à forte vitesse de chute  $z = \frac{w}{K}$  ( fort)

La concentration restera constante avec des matériaux légers à faible vitesse de chute

$$z = \frac{w}{K} \quad (\text{faible})$$



cf. croquis ci-contre

•**Mise en suspension** : Il faut qu'agisse sur le grain une force tractrice telle que :

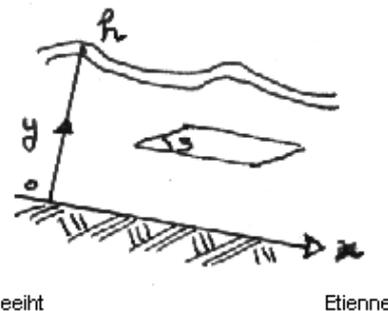
$$u'_x > w$$

$u'_x$  : vitesse de turbulence

w : vitesse de chute

Le grain se déplacera alors dans le plan horizontal S

Notons que les pertes par turbulence s'effectuent dans le milieu lui-même ( thermique).



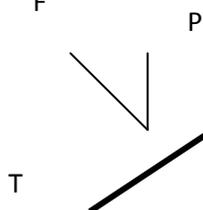
Cf. croqui

Enseeiht

Etienne

Tout se passe alors comme si le grain suspendu bénéficiait d'une force de portance ( tractrice)

$$\tau = K \cdot \rho \cdot u^2$$



S: surface du maître-couple  
 K coefficient hydrodynamique  
 u : vitesse du flot

Le grain vole comme un avion de vitesse  $V$ ,  $P$  = portance,  $T$  = traînée avec  $P = K_y S V^2$

2

### 565. 3 Application à l'estuaire de la Gironde

Il s'agit donc de l'estuaire confluent commun de la Garonne et de la Dordogne voir carte ci-contre

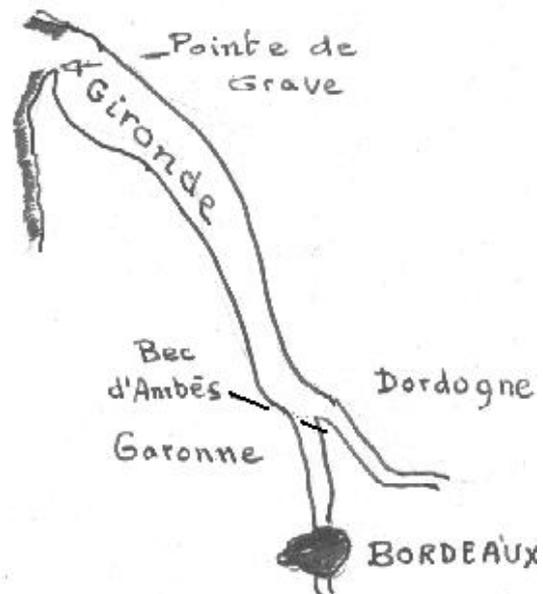
- Débit liquide : débit moyen :  $989 \text{ m}^3 / \text{seconde}$  dont 65 % pour la Garonne
- Débit solide : Pour la Garonne la turbidité varie de 80 à 1 00 mg/l

Pour la Dordogne elle varie de 40 à 90 mg/l

La turbidité ( débit solide) forte en début de crue baisse ensuite, on estime le débit solide annuel à ..... 2,5 millions de tonnes pour la Gironde.

- Marée : La marée du golfe de Gascogne est de type semi-diurne avec une période de 12 H 25 ', le marnage ( différence entre haute et basse mer) s'élève à 5, 5 mètres et sa limite d'action peut atteindre 160 km. Mais si la Gironde essuie une crue la marée n'atteint plus que la zone à 70 km de la Pointe de Grave. La non miscibilité de l'eau douce avec l'eau marine crée des courants résiduels vers l'AMONT dans le fond, vers l'AVAL en surface.

Cf. carte ci-contre

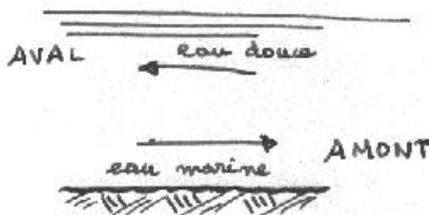


Fédération des chasseurs de la Gironde

- Bouchon vaseux : La conjonction du débit solide et des courants résiduels donne naissance à un "bouchon vaseux estuarien " situé à la limite de l'intrusion saline laquelle en période d'étiage se situe au niveau du Bec d'Ambès, les dépôts s'effectuant alors entre Bordeaux et ledit Bec.

En période de crue par contre le bouchon dérive à l'aval en direction de l'océan.

cf. schéma ci-contre



Ce bouchon, véritable bouillon de cultures, de concentration voisine de ..400 g/l voit s'accumuler les métaux, les bactéries....

### 56 .6 Le charriage

#### 566.1 Le Phénomène

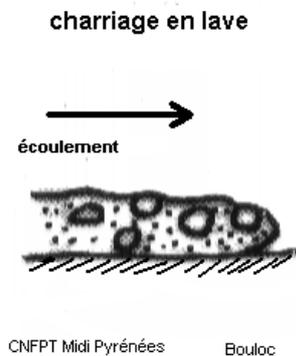
Le charriage désigne le transport sur le fond d'éléments non cohésifs. Chaque élément transporté subit un certain nombre de forces induites :

- par le fond qui peut être considéré comme fixe
- par la gravité
- par l'écoulement

• Dans les torrents l'on distingue aussi le charriage " hyperconcentré" où il existe une couche de transport ( boue) séparant l'élément transporté du fond du cours d'eau.

Il s'agit donc d'une phase dispersée (le galet considéré) dans une autre phase dispersante<sup>58</sup>(l'écoulement).

cf. croquis ci-contre



• Dans le cas de charriage sur des éléments sableux : l'on a des dépôts ou des dunes sableuses comme sous l'effet du vent sur le sable du désert.



A s'avère assez mal connu  $A = \frac{h}{(s-1)d_{50}}$  h : hauteur d'eau et l la pente  
s : densité du matériau

$d_{50}$  : dimension du grain en m telle qu'il n'y ait que 50 % en poids de grain de dimensions inférieures

### 566. 2 La théorie

Considérons un galet bloqué par un autre, soit  $\rho''_s g = \rho_s g - \rho g$  le poids spécifique relatif du galet

Le galet est soumis à son poids P et à une force F = charge ou pression . section

$$P = \rho''_s g \cdot V \quad (V, \text{volume})$$

$$F = C \cdot \rho g \cdot a \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (u, \text{vitesse et } a, \text{ maître-couple})$$

C : constante, fonction du critère de Reynolds

en écoulement turbulent donc avec  $R > 1000$  C reste constant = 0,05

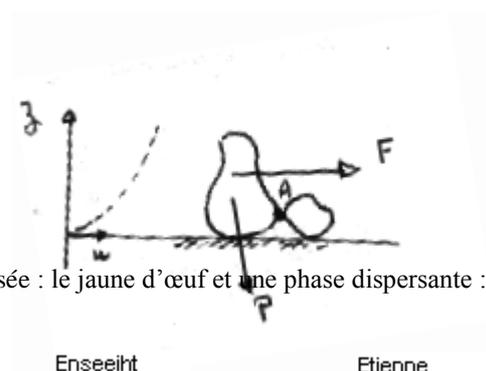
en écoulement laminaire donc avec  $R < 1$   $C = \frac{r}{4}$  (r, rayon du galet)

R

Le galet partira en charriage si le moment de renversement est plus grand que le moment stabilisateur

donc si  $F > \lambda P$  ( $\lambda$ , rapport des bras de levier)

voir figure ci-contre



<sup>58</sup> Rappelons que la mayonnaise comprend une phase dispersée : le jaune d'œuf et une phase dispersante : l'huile le vinaigre chaud permet de la rattrapper si elle ne prend pas.

• Notion de **force tractrice** : Ecrivons l'équilibre entre la force de pesanteur projetée selon le courant et les contraintes de frottement :

$$\rho g \cdot \omega \cdot dx \cdot i = \tau \cdot \chi \cdot dx$$

avec  $i$  : pente de la ligne d'eau ,  $R = \omega$  ( rayon hydraulique )

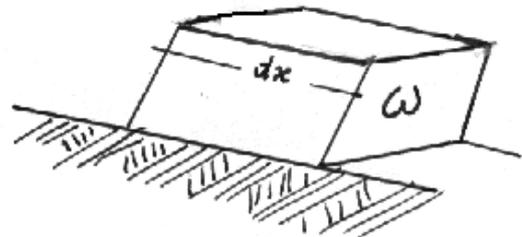
$\chi$

$\tau$  : contrainte de frottement / mètre de longueur

$$\tau = \rho g \cdot R \cdot i$$

cette force tractrice fera glisser les matériaux sur le fond.

Cf. croquis ci-contre



Enseeiht

Etienne

• **Formule** de Meyer -Peter : On l'utilise pour les galets, les graviers, les sables grossiers dans des conditions laminaires ( fluviales) et non pas turbulentes ( torrentielles):

$$q^{2/3} \cdot i = a + b g^{2/3}$$

$d_{\text{moyen}}$                        $d_{\text{moyen}}$

$g$  : débit solide/ mètre de largeur de l'écoulement,

$d_{\text{moyen}}$  : diamètre des galets, graviers,

enfin  $i$  représente la pente de l'eau.

avec  $q$  = débit liquide / unité de largeur d'écoulement et  $Q = l \cdot q$

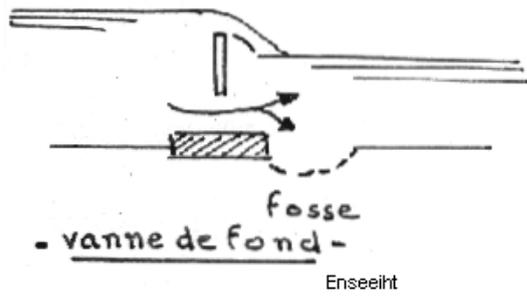
si le fleuve est très large donc  $l$  grand l'influence des berges ( donc du frottement) reste faible

On utilise des hydrophones posés sur le fond du lit pour connaître la zone de charriage dans la largeur de la rivière , car il n'existe forcément dans toute la largeur du lit

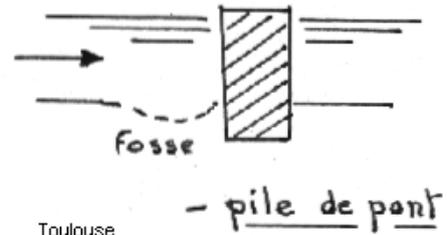
### 566. 3 Applications lors des travaux hydrauliques

• **Affouillements** : Ils sont dus aux changements des formes d'écoulement ( laminaire ou turbulent) en quelques dizaines de seconde et qui provoquent le charriage.

voir croquis infra.



Enseeiht



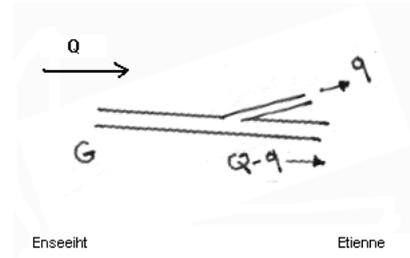
Toulouse

• **Prise d'eau en rivière** : On veut prélever un débit liquide  $q$ , le débit solide étant  $G$   
 Soit  $Q_c$  le débit liquide critique d'entraînement des matériaux ;  
 si  $q / Q_c$  reste petit, tout va bien et les matériaux continuent d'être entraînés

si  $q = Q_c$ , à l'aval le débit solide  $G$  restera là,

il ne sera plus entraîné, on constate un dépôt,  
 d'où dragage à effectuer

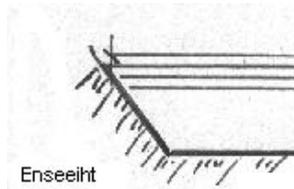
cf. croquis ci-contre



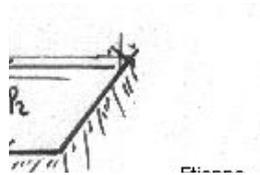
Enseeiht

Etienne

• **Stabilité des berges** : Elle dépend de la force tractrice, définie par  $\tau$ , sur le FOND



Enseeiht



Etienne

si  $\frac{V}{h} > 4$   
 $\tau = \rho g \cdot R \cdot i$   
 si  $\frac{V}{h} < 4$   
 $\tau = 0,8 \rho g \cdot R \cdot i$

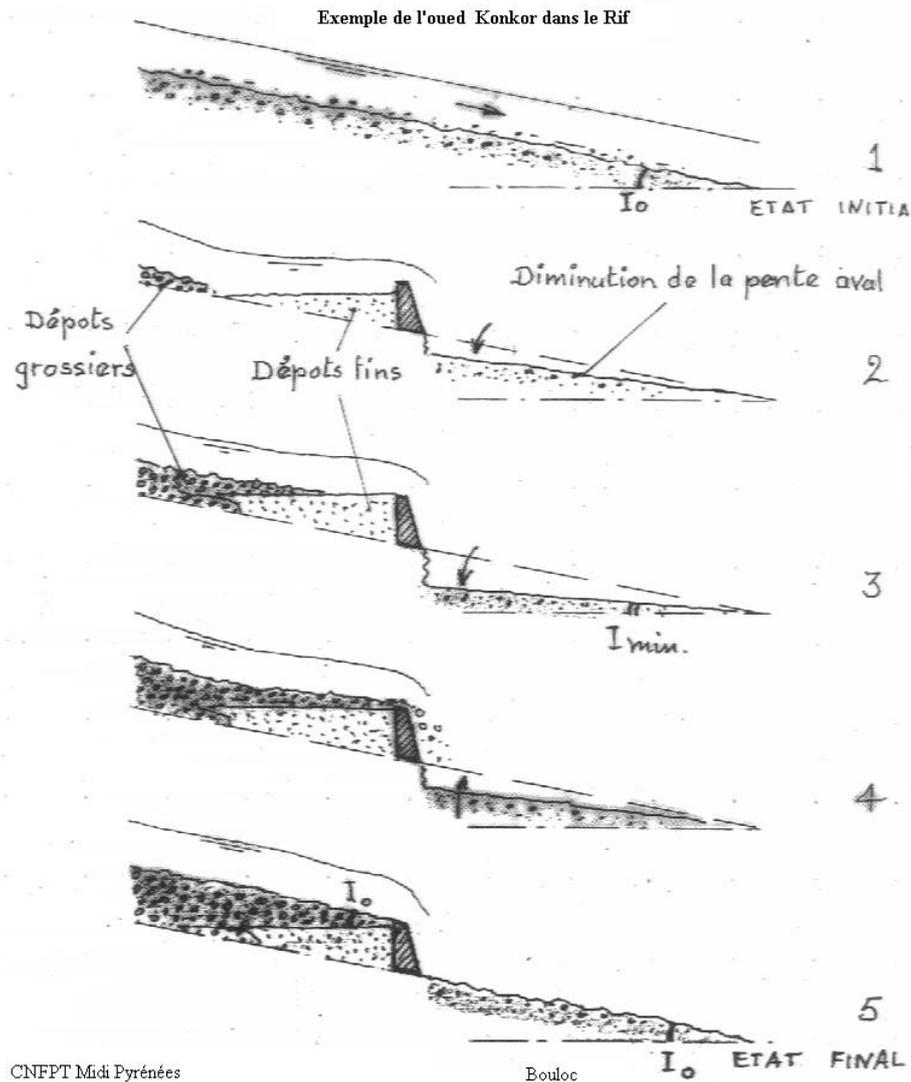
$$\tau = \rho g \cdot R \cdot i$$

$$\tau = 0,8 \rho g \cdot R \cdot i$$

$$\tau = 0,75 \rho g \cdot R \cdot i$$

voir croquis

### 566.4 Conséquence de l'arrêt des matériaux sur un oued à fort transport solide



## 6 Régime, morphologie, écoulement des cours d'eau

River ! that in silence windest,  
Through the meadows, bright and free,  
Till at length thy rest thou findest,  
In the bosom of the sea<sup>59</sup>

Longfellow To the river Charles

Ils se définissent en fonction du climat et de l'altitude

### 61.1 Equatorial

Les débits restent constants toute l'année, par exemple : l'Ogoué au Gabon.

### 61.2 Tropical

Il existe une saison sèche et une saison humide:

<sup>59</sup> Rivière, qui serpente en silence, à travers les prairies, brillante et libre jusqu'à ce qu'à la longue, tu trouves ton repos dans le sein de la mer.

ex : le Bénoué au Sénégal peut rouler 100 fois plus d'eau en été qu'en hiver, le Gange rentre dans cette catégorie.

### 61. 3 Aride

L'écoulement reste intermittent, les crues torrentielles séparées par de longue période d'aridité ex: les ouadis sahariens.

### 61. 4 Méditerranéen

Il existe une pénurie grave en été mais par contre l'on constate une abondance en période froide ex : le Jabron, le rio Ebro.

### 61. 5 Océanique

L'on rencontre les hautes eaux en saison froide avec des différences peu accentuées, ex: la Tamise.

### 61. 6 Continental de plaine

L'influence nivale devient croissante, les hautes eaux apparaissent en Avril, Mai et les basses eaux en Septembre Octobre ; ex: le Danube et la Volga.

### 61.7 Montagnard et glaciaire

haut-bassin : le débit maximum arrive en juil. et août, l'hiver l'eau manque ; ex : l'Arve  
bassin-moyen : le débit maximum apparaît dès juin ; ex: l'Isère, voire, dès Mai pour la Garonne ou la Durance.

N.B. :Certains fleuves très longs possèdent des régimes complexes.

## 62 Morphologie des cours d'eau

### 62.1 Différences entre canal et cours d'eau

#### 621.1 Débit :

Il reste constant pour un canal, alors qu'il peut varier de 1 à 100 pour une rivière.

#### 621. 2 Berges

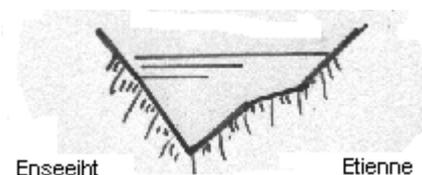
Les berges restent stables pour un canal, parfois elles sont revêtues de béton.

En rivière il existe une érosion tendant à stabiliser les berges selon un profil d'équilibre. Leur végétation revêt de l'importance lors des crues. Enfin l'action anthropique se manifeste , par exemple : construction d'un quai, peut entraîner des affouillements.

#### 621. 3 Fond

Le fond des fleuves peut présenter des irrégularités

cf. croquis ci-contre



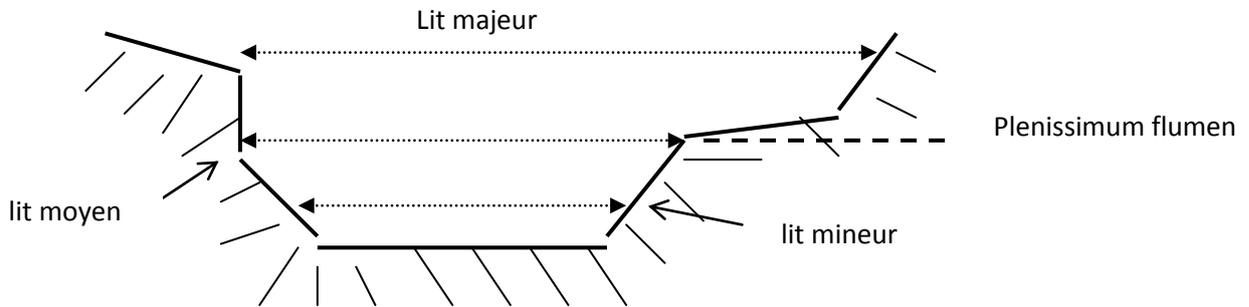
## 62. 2 Caractéristiques

### 622. 1 Profils en travers

On définit trois lits : le lit mineur, correspondant à l'étiage

: le lit moyen , quand la rivière coule à pleins bords avant débordement l'on se trouve au " plenissimum flumen " ( cela indique la limite du domaine public fluvial)

: le lit majeur, correspondant à la crue



Par exemple, le lit moyen de la Garonne à Toulouse atteint → 150 m  
du Nil en Egypte atteint → 600 m  
du Congo à Brazzaville atteint → 4 km

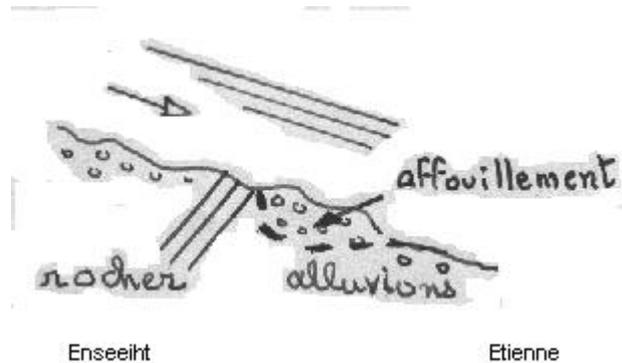
### 622.2 Pente

La pente se révèle très variable selon les cours d'eau, par exemple

- la Garonne à Toulouse présente une pente de 1 m/km
- la Durance à Cadenet présente une pente de 2,3 m/km

La puissance de l'eau affouillera les alluvions après le rocher et créera une chute entraînant une pente discontinue.

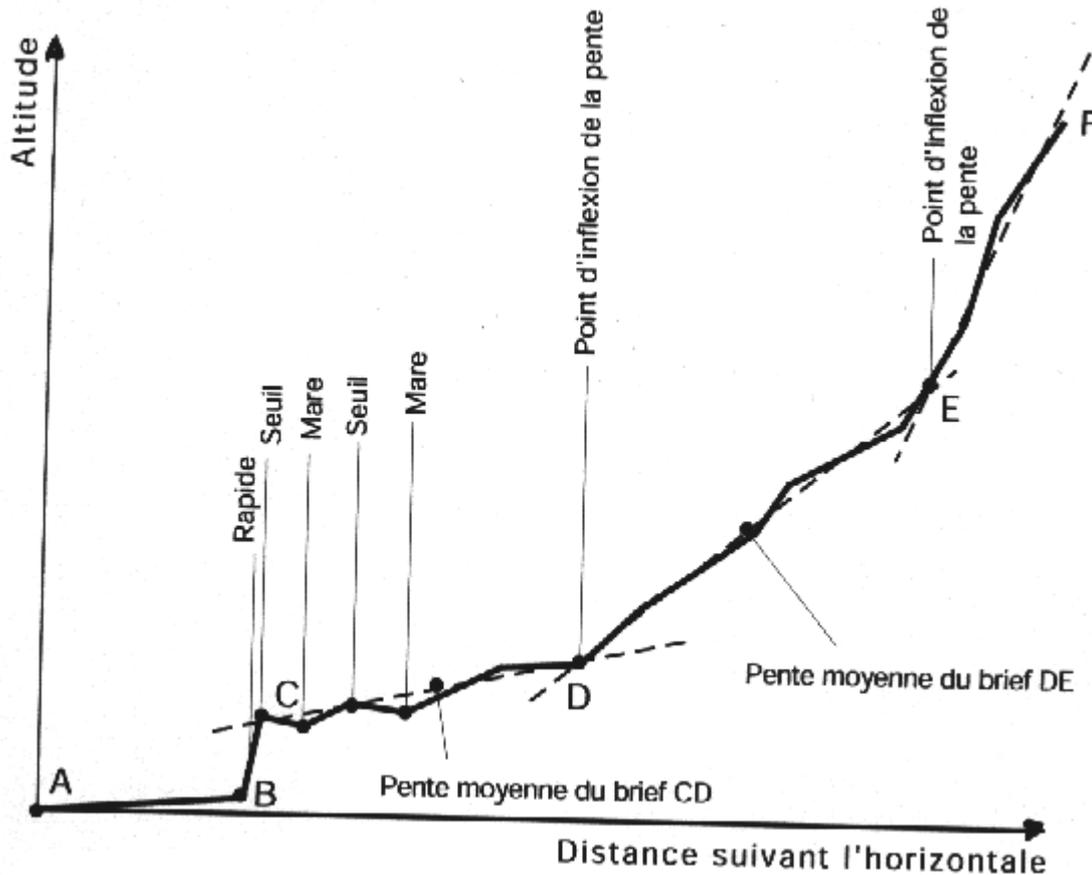
voir croquis ci-contre



### 622. 3 Profil en long

Le profil en long du cours d'eau est la variation de l'altitude des points du talweg en fonction de leur distance à une origine (embouchure) .

Cf. graphique infra

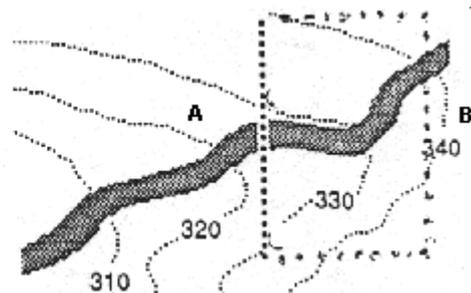
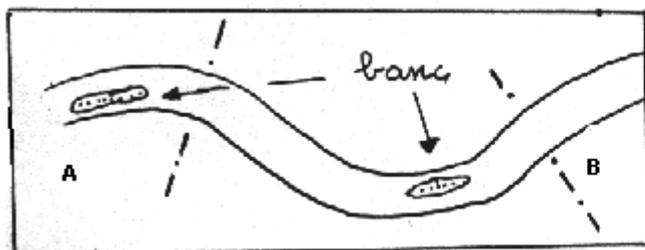


Organisation météorologique mondiale      Guide des pratiques hydrologiques  
 Un certain nombre d'entités topographiques figurent sur ce profil : rapide, inflexion, seuils, mouilles (mares)....., si la pente moyenne ne présente que peu de signification pour la raison citée supra (discontinuité) la connaissance de la pente des biefs successifs se révèle essentielle pour les calculs d'écoulement.

#### 622. 4 Tracé en plan

Signalons qu'un fleuve ne possède jamais un tracé rectiligne ; il est constitué de courbes et de contre-courbes, encombrées de bancs ou seuils qui peuvent être stables ou se déplacer.

Cf. croquis infra

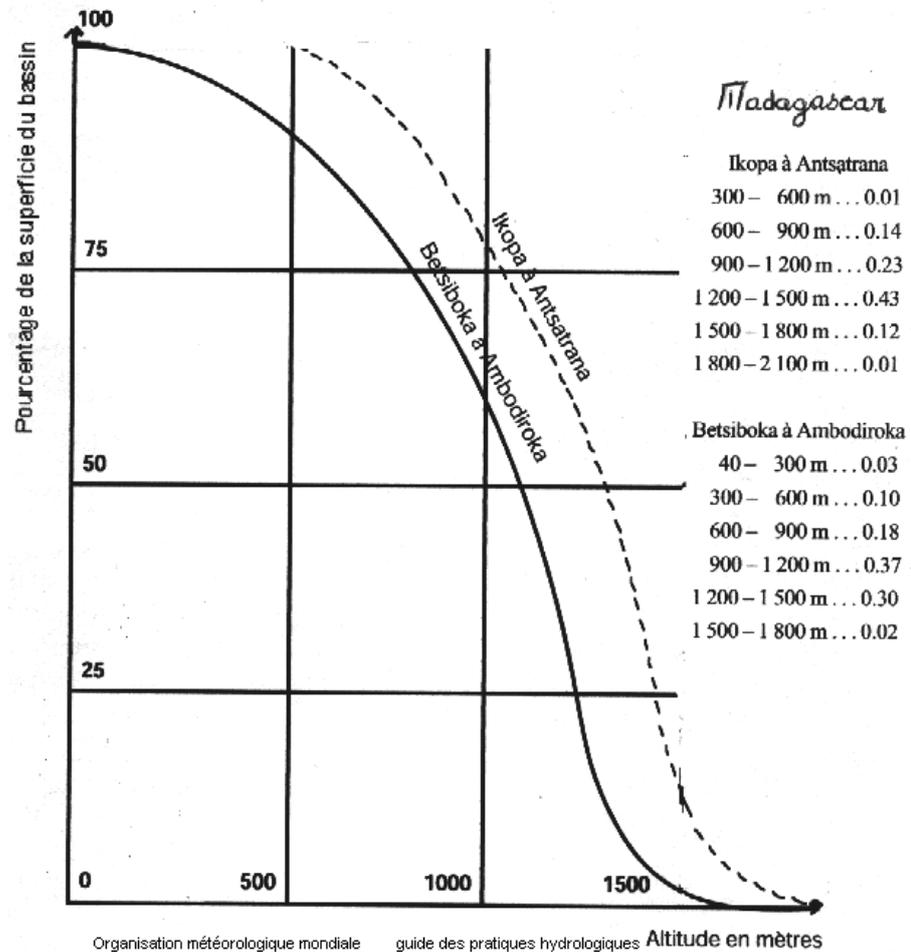


Les bancs ou seuils se situent à  $\frac{1}{4}$  à l'amont et les mouilles ou mares se trouvent par contre à  $\frac{1}{4}$  à l'aval, par rapport à l'axe du méandre, voir les lois de Fargue.

### 622. 5 Superficie du bassin

Une fois le périmètre du bassin délimité, l'on peut par planimétrie calculer sa superficie, mais la connaissance des altitudes joue un rôle important elle est représentée par l'hypsométrie<sup>60</sup>.

La



la courbe hypsométrique indique en ordonnées le pourcentage % de la superficie drainée dont l'altitude est supérieure ou égale à une altitude indiquée à l'abscisse correspondante.

Cf. graphique  
Ci-contre représentant  
2 cours d'eau malgaches

### 63 L'écoulement

#### 63. 1 Formules de Chézy et Maning

On sait que :  $Q = u \cdot \omega$

① Selon Chézy  $u = c \sqrt{Ri}$   $R = \frac{\omega}{u} = \text{section mouillée}$

<sup>60</sup> Ο ύψος : la hauteur et το μέτρο : la mesure

② périmètre mouillé

i = pente

C : coefficient ; f ( nature des berges et du fond)

② Selon Manning  $C = K_s \cdot R^{1/6}$  R = rayon hydraulique  
et  $K_s = \frac{26}{d_c^{1/6}}$  ( système MTS )

$d_c$  : diamètre caractéristique selon la granulométrie, la rugosité sera celle des gros éléments.

$K_s = 20$  ( galets)

$K_s = 30$  ( graviers)

$K_s = 50$  ( sable)

Plus l'eau monte, plus la rugosité baisse, car les seuils sont alors noyés.

On obtient à partir de ① et ② l'équation

☀  $u = K_s R^{2/3} i^{1/2}$

mais pour les fleuves on calcule les coefficients spécifiques. A l'occasion du barrage d'Assouan, on a établi la formule suivante pour le Nil  $u = k R^{0,35} \cdot i^{0,22}$

### 63. 2 Origines des pertes en rivière

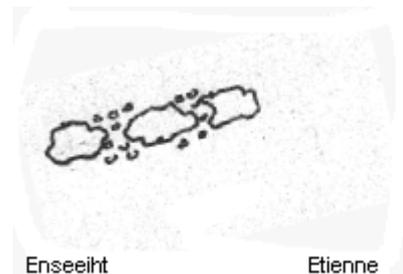
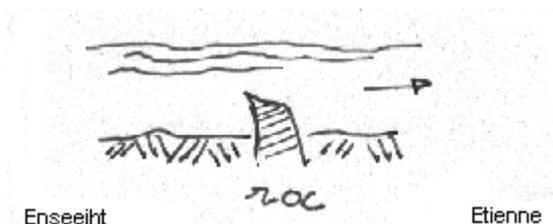
• Par **frottement** sur les rives

• Par **turbulence** :

Il existe des fluctuations de vitesse entraînant des turbulences ; en ce cas la perte s'effectue dans le milieu lui-même, avec apparition d'énergie thermique.

Notons que la turbulence abaisse la rugosité  
Voir croquis ci-contre

• Par **perte singulière** :



Sur un roc , en ce cas la perte s'exprime par de l'énergie mécanique.  
cf. croquis ci-contre

### 63. 3 Application aux courbes de remous

#### 633. 1 Définition de la courbe de remous

Elle permet de connaître la surélévation du plan d'eau :

• le remous d'**exhaussement** quand il est connu évite de noyer les terrains

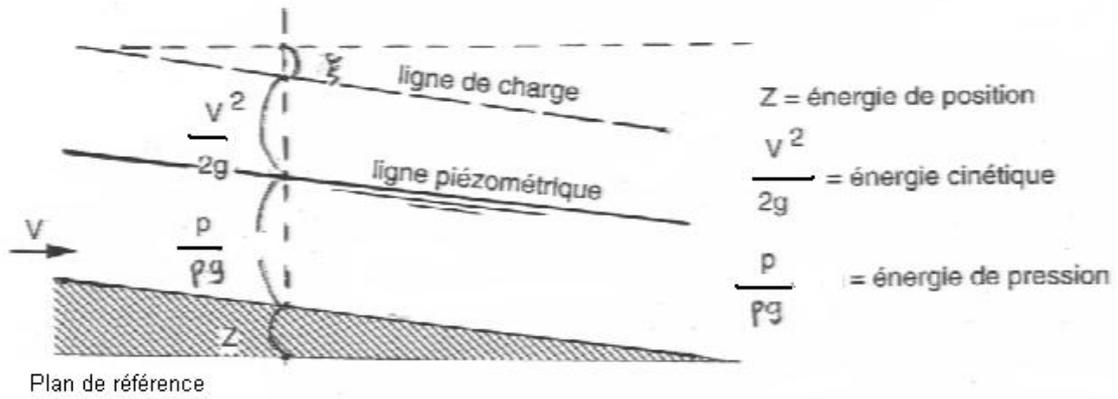
• le remous d'**abaissement** se rencontre quelquefois, par exemple quand on remplace un pont à piles par un pont suspendu.

#### 633. 2 Principe de la résolution en rivière

• équation de **Bernoulli** ( énergie d'un fluide en mouvement)

$$z + \underline{p} + \underline{u^2} = \text{énergie} \quad \text{cf. graphique infra}$$

Equation de Bernoulli en régime uniforme



ou  $z + p / \rho g + u^2 / 2g + \xi_x = \text{constante}$  (sur une même trajectoire de la veine fluide)

$z$  : énergie de position (pesanteur)

$p$  : l'eau est à la pression  $p$ , elle passe à la pression atmosphérique elle libère de l'énergie

$\rho g$

$u^2$  : l'eau possède une énergie cinétique

$2g$

Du fait des frottements il existe une perte de charge entre  $M_1$  et  $M_2$  égale à  $\dots$   
 d'UNE PART

et dans un écoulement à surface libre  $p = 0$

d'AUTRE PART

il vient donc :  $z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \dots = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \dots$

$\dots$

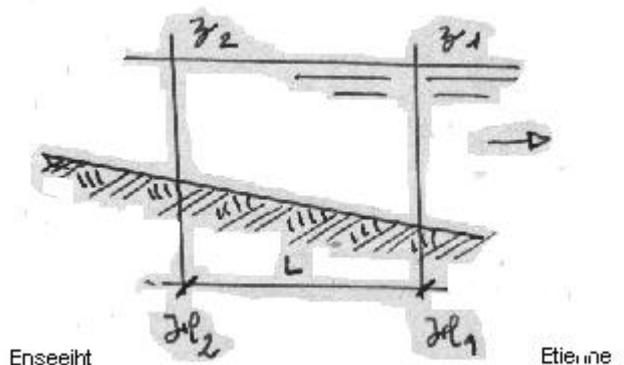
• application en rivière : On ne prend plus l'altitude du radier de la rivière, mais la surface libre

$$H = z + \frac{u^2}{2g}$$

$2g$

$H = H_2 - H_1 = \dots$   
 $\dots$   
 $\dots$

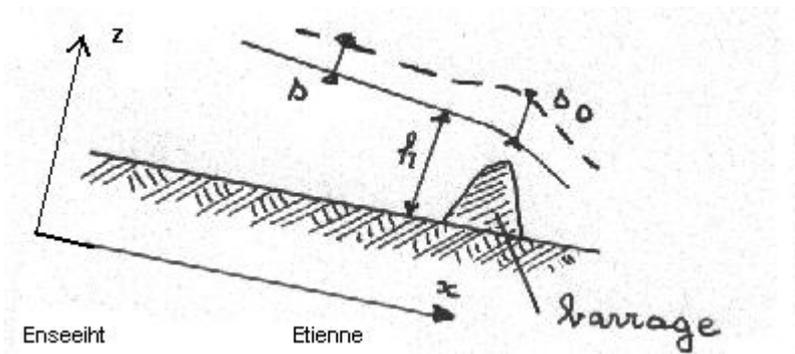
□ Dans la partie droite de l'égalité le premier membre représente la perte de charge, le second membre représente l'étranglement créant le remous cf. croquis infra



### 633. 3 Résolution de la courbe de remous

#### • méthode manuelle de Bakméteff

De nombreux auteurs tels que d'Aubuisson, Krivenstein ... ont établi des formules pour résoudre la question de la courbe de remous ; nous retiendrons celle de Bakméteff.



Cf. schéma ci-contre

Du fait du barrage la veine liquide au droit dudit barrage se gonfle d'une hauteur  $s_0$ , que se passe-t-il à l'amont ?

L'on y constate un exhaussement tel que

$$ds = - \frac{n}{F^3} \cdot dz$$

$$s = s_0 \cdot e^{-x}$$

ou par intégration

$$s = s_0 \cdot e^{-x}$$

$n$  : coefficient de Bakméteff

$F$  nombre de Froude ,sans dimension , indique l'influence de la pesanteur sur l'écoulement

$$F = \frac{u}{\sqrt{gR}}$$

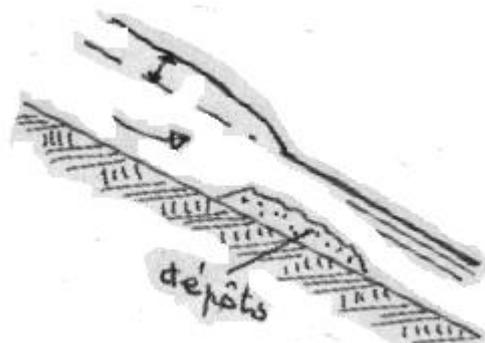
Le calcul s'effectue par approximation successive.

**Remarque :** On se trouve en régime permanent varié, si le débit reste constant, la surface libre et le fond de la rivière ne demeurent pas parallèles car

en fait, il existera par exemple

des dépôts à l'amont pouvant faire

remonter la ligne d'eau.



cf. croquis ci-contre

- méthodes **informatiques**

Il existe des programmes permettant d'effectuer le calcul par exemple " Eau 2 " du laboratoire national d'hydraulique de Chatou.

- vérification par les **modèles réduits** physiques basés sur la similitude de Froude qui s'énonce ainsi :

" ..... pour deux écoulements dynamiquement semblables les paramètres de similitude sont égaux.  
..."

Cela permet expérimentalement de vérifier les calculs souvent entachés d'imprécision, l'on obtient ainsi les dimensions pertinentes des ouvrages à construire.

## 7 Mesures

'  
' Ricordi tu, quando tratti delle acque,  
allegare l'esperienza e in seguito il  
ragionamento "  
Léonardo da Vinci

Souviens-toi lorsque tu traites des eaux, d'alléguer l'expérience et ensuite le raisonnement

### 71 Critères de mesure

#### 71.1 Types de mesure

- mesure des niveaux ou limnimétrie<sup>61</sup>
- mesure des vitesses ou tachymétrie<sup>62</sup>
- mesure des débits , ou débitmétrie
- mesure des débits solides ou de la turbidité
- mesure de la turbulence
- visualisation des courants

#### 71.2 Erreurs de mesure

---

<sup>61</sup>η λίμνη : l'étang το μέτρο = la mesure. Rappelons que le mètre est 1 650 753,73 fois la longueur d'onde dans le vide de l'orange du crypton

<sup>2</sup>ταχέως : rapidement; το μέτρο = la mesure

<sup>3</sup>(καθ) υστερώ = être en retard

- erreur **systématique**: elle se produit toujours dans le même sens
- erreur **accidentelle**: elle se produit dans un sens ou dans un autre, selon la faute de l'opérateur.

### 71. 3 Appareils de mesure

#### 713. 1 Définitions

- Conditions **normales d'emploi** : celles où l'on doit l'utiliser
- **Portée** : elle indique la zone où l'on peut mesurer
- Courbe d'**étalonnage** : parfois elle est superflue
- **Sensibilité** : il s'agit du quotient  $S = \frac{d u}{d v}$

ou  $\frac{\text{accroissement de la variable observée}}{\text{accroissement de la grandeur mesurée}}$

par exemple :  $S = \frac{d u}{d v} = \frac{\text{cm lu sur l'échelle}}{\text{augmentation du débit en l/s}}$

#### 713. 2 Qualités

• **Précision** : Un instrument se montre d'autant plus précis qu'il donne la grandeur à mesurer avec une approximation faible.

Il faut aussi posséder la sûreté de lecture, la mobilité, la justesse, sinon des erreurs vont diminuer la qualité. Voyons les erreurs les plus communes :

erreur de lecture, de mobilité, d'hystérésis<sup>63</sup>, de fidélité, de zéro, de justesse de la courbe d'étalonnage.

Finalement, la précision =  $\sqrt{\Sigma \text{ erreurs}}$

• **Rapidité** : il s'agit de la manière de suivre dans le temps la grandeur à mesurer

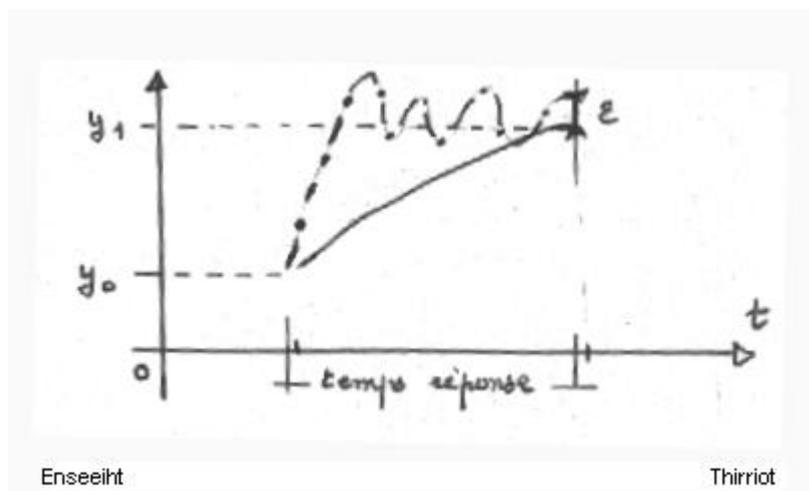
$\sigma$  = erreur de précision

si l'appareil n'est pas amorti, et que

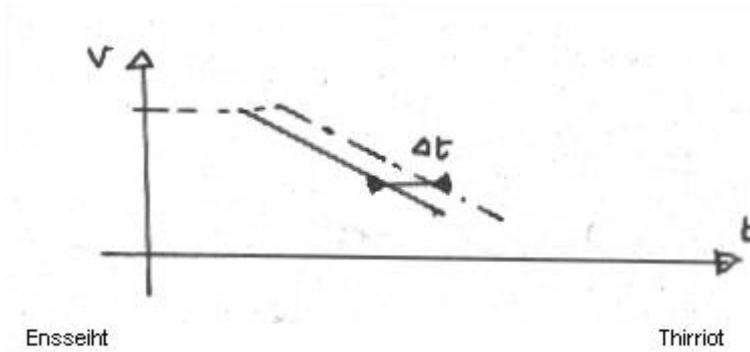
le phénomène varie rapidement

on trouve la courbe en trait-point

cf. graphique ci-contre



Pour un phénomène à variation lente, il existera un écart  $\Delta\tau$

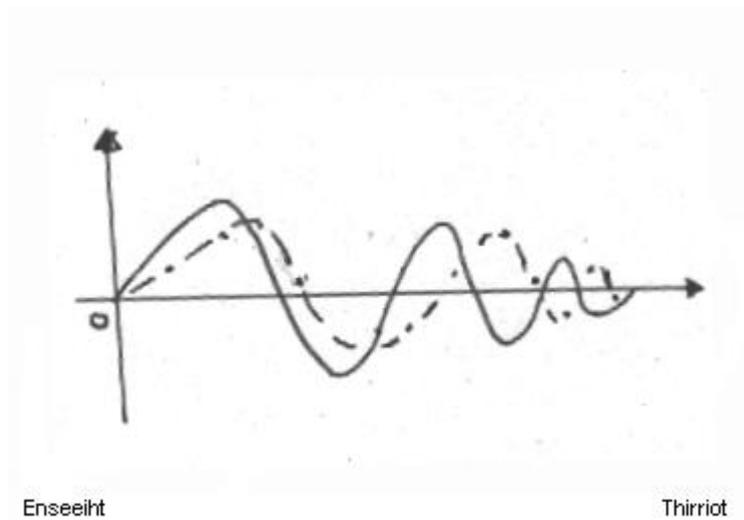


cf. figure ci-contre

Il peut apparaître une distorsion pour un phénomène rapidement variable. Il existe une marge entre minimum et MAXIMUM

pour laquelle l'appareil crée une distorsion.

Cf. figure ci-contre



•Finesse

~ dans le temps :

avec :  $x = \text{valeur instantanée} ; x = \text{valeur moyenne} ; x'_t = \text{pulsation}$   
 sur une période T

$$\int_0^T x'_t dt = 0$$

dans l'espace :

sur une distance s

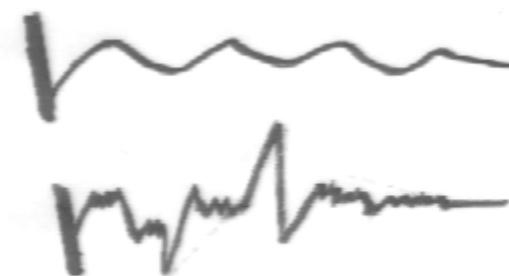
$$x_{\alpha\beta} = x_{\alpha\beta} + x'_{\alpha\beta}$$

$$\int_s x'_{\alpha\beta} d\alpha \cdot d\beta = 0$$

Il faut adapter l'appareil pour le même phénomène,

on obtiendra deux courbes :

cf. croquis ci-contre



le plus gros

le plus fins

Enseieht

Thirriot

Enfin, la réaction de l'appareil sur le milieu à mesurer joue un rôle : moins la réaction est forte, et plus la finesse est grande.

## 72 Mesures de niveaux

### 72.1 Echelle limnimétrique

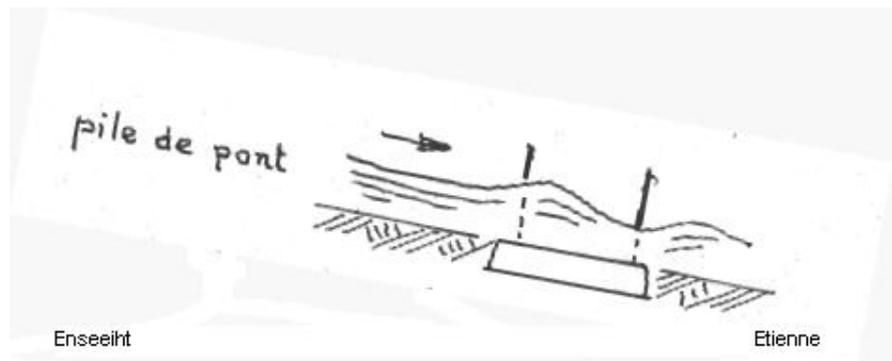
Il s'agit d'une échelle graduée placée dans un endroit dont on connaît la section. A tout moment on peut lire la hauteur atteinte par l'eau sur l'échelle limnimétrique.

Cf. croquis infra.



Il faut évidemment bien placer l'échelle, par exemple le voisinage des piles de pont reste à éviter en raison du ressaut hydraulique

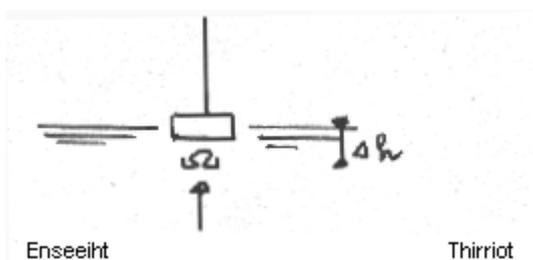
Cf. croquis ci-contre



### 72. 2 Limnigraphe à flotteur

#### 7221 Principe

Il s'agit d'un flotteur de 80 mm environ placé dans un tube tranquillisateur ( 200 mm ) communiquant avec la rivière , si l'eau monte de 1 m le flotteur reçoit une poussée d'Archimède



$$P = \rho g \cdot h \cdot Q$$

cf. croquis ci-contre

Le câble du flotteur transmet les variations de hauteur à la roue de mesure du codeur-

selon la photographie ci-contre

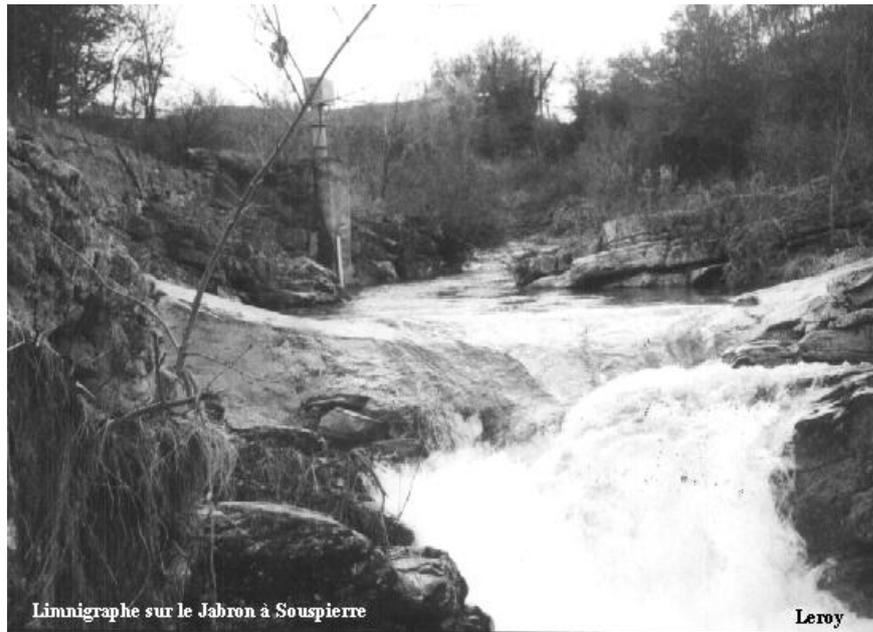
L'afficheur peut être relevé en temps réel à partir d'un modem radio OU d'une base satellite. L'on pourrait aussi enregistrer sur le papier disposé sur le cylindre, visible ci-contre derrière la vitre



## 722. 2 Description du limnigraphe de Souspierre sur le Jabron

L'on remarque aussi que l'afficheur est posé sur le limnigraphe, le tout étant abrité dans une armoire du type de celle figurant sur la partie gauche de la photographie prise à Souspierre sur le Jabron.

Sur la photographie infra prise de l'aval, l'on notera la veine liquide coulant dans l'axe d'un dièdre bétonné en forme de V très ouvert construit pour disposer d'une section calibrée nécessaire pour les calculs



Sur la photographie ci-contre de la vue de détail du limnigraphe,

l'on observe

de bas en haut :

- une échelle limnimétrique,
- le tube abritant le flotteur,
- l'armoire coiffant le tout qui abrite la roue,

le codeur et l'éventuel afficheur

### 722. 3 Utilisation du limnigraphe

#### pour la mesure des débits ou jaugeage

A partir de la connaissance de la section de la rivière ( dans le cas de Souspierre un dièdre évasé)

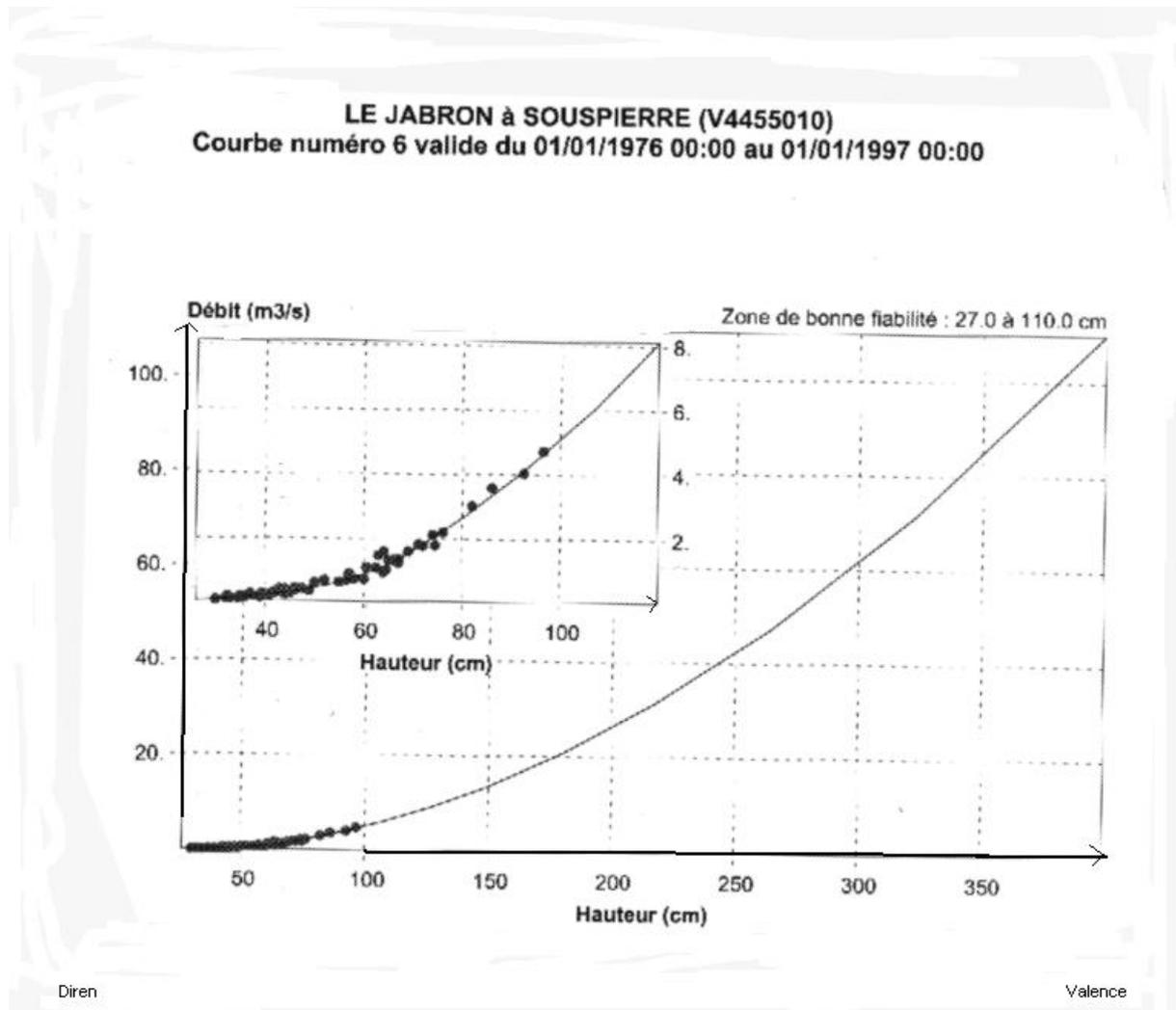
d'une part

et d'autre part

des mesures expérimentales de vitesse au moulinet :

l'on peut établir la courbe donnant le débit en fonction de la hauteur d'eau h de type  $q = \int_{\omega} u \cdot d\omega$  :

$$Q = \sqrt{2g} \cdot h^{5/2}$$

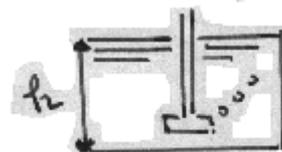


voir graphique infra

### 72. 3 Limnigraphe à bulles d'air

#### 723. 1 Principe

L'air comprimé produit par un compresseur aboutit dans l'eau par un tube, pour que les bulles sortent il faut que la pression p de l'air équilibre la hauteur h avec  $p = P_{atmosphérique} + h$   
 cf. croquis ci-contre



Enseeiht

Thirriot

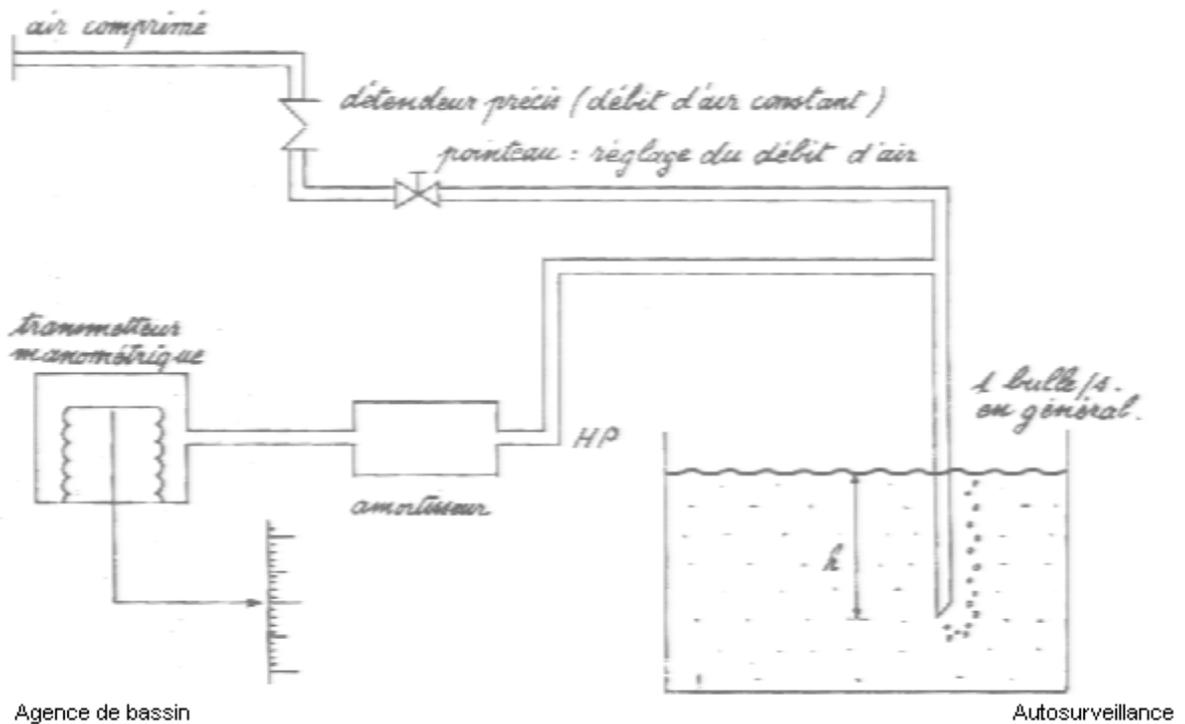
Environ 5 à 6 bulles sortent à la seconde. Il faut tenir compte aussi de la densité du liquide

#### 723. 2 Application industrielle

Les variations de niveau sont converties en variations de pression enregistrées à l'aide d'un transmetteur mécanique ou électronique qui établit une relation pression / hauteur manométrique de l'eau.

La pression mesurée ne dépend que de la hauteur d'eau et de la pression atmosphérique instantanée

Cf. schéma infra



#### 72. 4 Limnigraphe à radar

Dans le cas de cours d'eau à forte

teneur en matières en suspension, dans

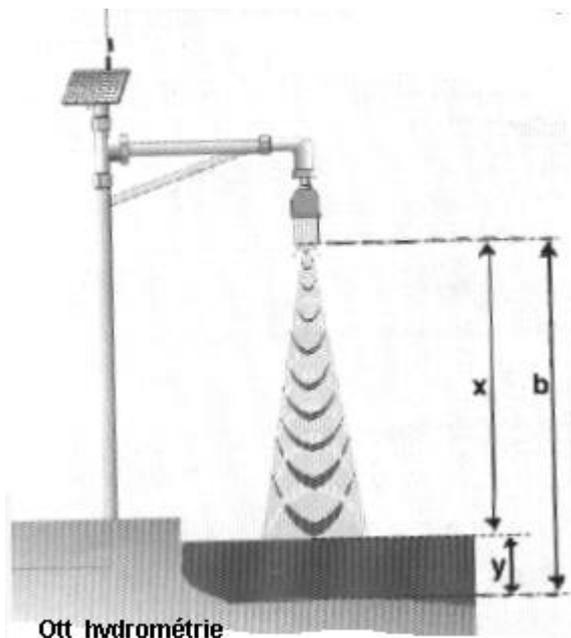
les torrents, les ouadi, l'on peut utiliser un

capteur radar installé au dessus du plan d'eau

cf. schéma ci-contre

Les ondes électro-magnétiques émises en direction du plan d'eau sont réfléchies, l'on obtient  $x$

Une station externe, à partir de  $x$  reçu et de la connaissance de  $b$ , calcule alors la hauteur d'eau  $y$ .



## 73 Mesures de vitesses

### 73.1 Méthode empirique du flotteur

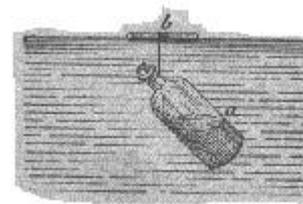
#### 731. 1 Principe

Elle ne permet qu'une approximation, car beaucoup d'imprécisions viennent grever la mesure, même en admettant que la section mouillée soit bien connue. La sinuosité du cours d'eau, l'enherbement des berges, la profondeur, les remous, constituent autant d'éléments qui peuvent modifier la vitesse du flotteur. Il convient donc de prendre les précautions suivantes :

- dégager le fond et les berges de tout ce qui peut ralentir le courant et donc le flotteur sur la longueur de flottaison.
- choisir un parcours assez rectiligne et de pente faible
- veiller à ce que le flotteur flotte librement ; il doit bien pénétrer la masse d'eau en mouvement, et ne pas être freiné ou arrêté par les aspérités de terrain.
- Ledit flotteur est constitué d'une petite bouteille **a** ( 1 décilitre) munie de son bouchon, à son goulot l'on attache par une courte ficelle un bouchon ordinaire **b**, ensuite on leste la bouteille par de la grenaille de plomb de façon que tout l'appareil flotte, le bouchon **b** restant seul à la surface du liquide

On dispose ainsi d'un flotteur insensible à la résistance du vent et qui marche avec la vitesse moyenne des filets situés près de la surface

cf. croquis ci-contre



Port à Mousson

Debauve

#### 731. 2 Exemple de calcul

Supposons que l'on ait déterminé une section trapézoïdale ayant 75 cm de grande base, 50 cm de petite base et 40 cm de hauteur :

la surface de la section mouillée devient :  $\frac{75 + 50}{2} \cdot 40 = 2500 \text{ cm}^2$

$1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2$  donc  $2500 \text{ cm}^2 = 0,25 \text{ m}^2$

avec une vitesse mesurée de..... 0,5 m/s

le débit passant dans la section mouillée en 1 seconde :  $0,25 \times 0,5 = 0,125 \text{ m}^3/\text{s}$  ou 125 l/s

### 73. 2 Méthode d'exploration du champ de vitesses par moulinet

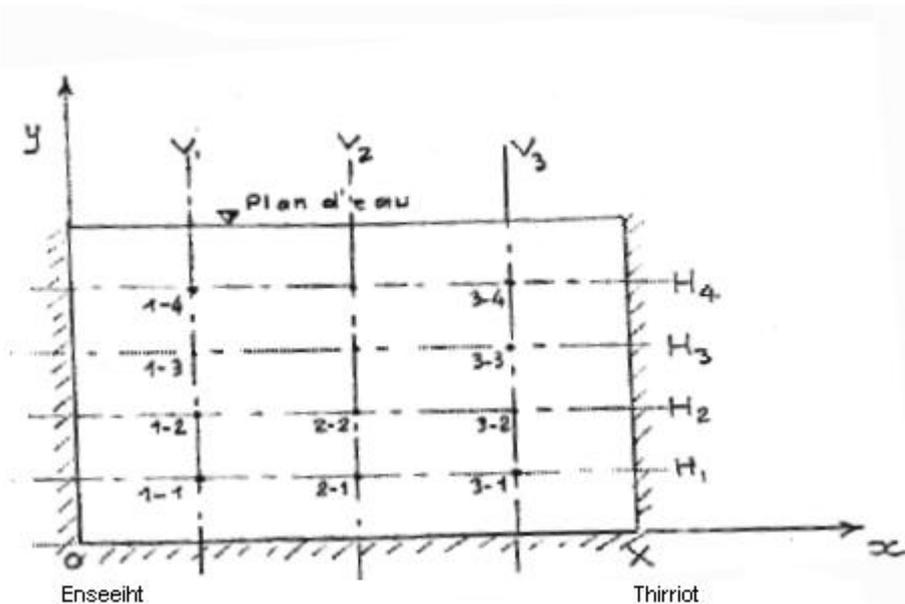
#### 732. 1 Théorie

- Principe du **quadrillage** :

Il faut disposer en premier lieu d'une section de " jaugeage " telle, qu'elle soit :

- perpendiculaire à la direction de l'écoulement
- et que l'écoulement s'effectue de façon stable, en filets parallèles sans tourbillon ni remous.

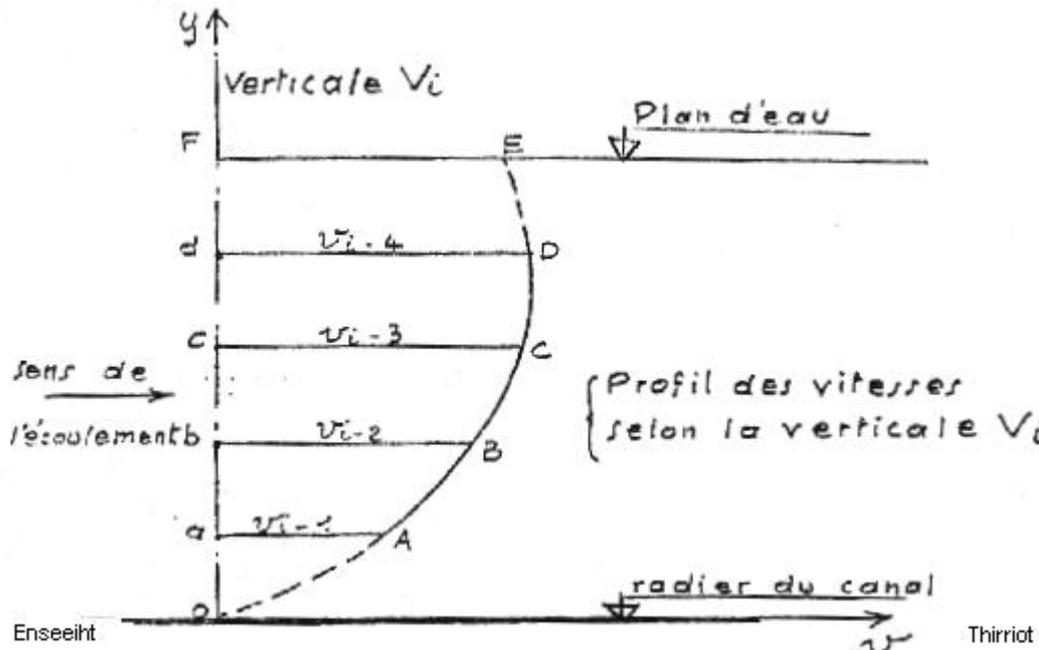
Soit alors  $\Omega$  cette section rapportée à un système d'axe  $x O y$ , comme l'indique la figure infra et sur ces axes,  $x$  l'abscisse égale à la largeur de la rivière et  $y$  l'ordonnée égale au tirant d'eau en régime permanent correspondant au débit  $Q$  que l'on veut déterminer. Cf. graphique *infra*



La connaissance d'un certain nombre de vitesses locales  $v$  dans la section de jaugeage, conduit à un quadrillage de  $\Omega$  aux noeuds desquels se mesureront lesdites vitesses locales  $V_{11}$ ,  $V_{12}$ ,  $V_{13}$  sur la verticale  $V_1$ .

• **Profil** des vitesses selon une verticale

Le champ de vitesses ne sera autre que l'ensemble des vecteurs représentant les vitesses locales aux divers points de toutes les verticales explorant la section de jaugeage. Cf. graphique infra



• la connaissance de ce **champ de vitesses** va dès lors permettre de déterminer le débit  $Q$  en effectuant " la sommation des débits élémentaires " calculés à l'aide de ces profils. On peut écrire

$$Q = \iint_{\Omega} v \cdot d\Omega = \iint_{\Omega} v \cdot dx \cdot dy$$

donc

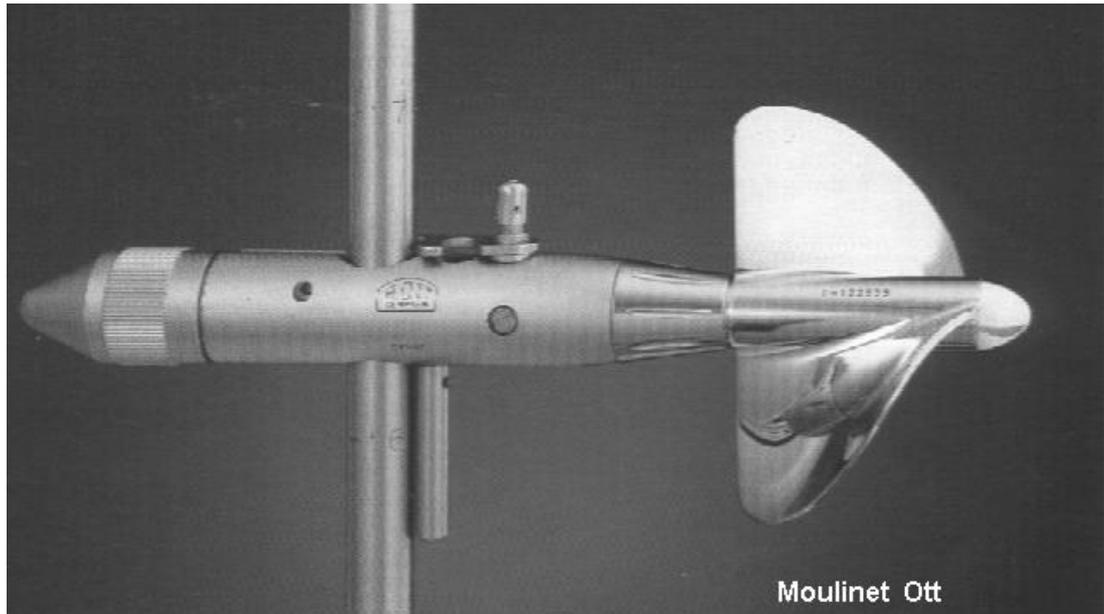
$$Q = \int_0^x dx \int_0^y v \cdot dy$$

## 732. 2 Emploi du moulinet

### •Description

Le moulinet comprend une hélice (mise en rotation par le courant) à palettes hélicoïdales fixées à un axe, tournant sur roulement à billes dans de l'huile très fluide (frottements réduits au maximum). Cet axe ferme, à chaque tour, un circuit électrique comportant une sonde de courant continu. Et l'appareil traduit donc le nombre de révolutions de l'hélice en impulsions électriques qu'un compteur enregistre.

L'axe, les roulements, les micro-contacts sont logés dans un corps profilé et étanche qui sert aussi à fixer le moulinet et sa perche. Cf. photographie infra



La formule liant la vitesse du courant aux nombres de tours de l'hélice/seconde s'écrit :

$$v = k n$$

$k$  = le pas de l'hélice

Mais ceci correspond à un moulinet idéal. En fait, on ne peut naturellement qu'approcher plus ou moins ces conditions idéales ; d'où nécessité d'un étalonnage.

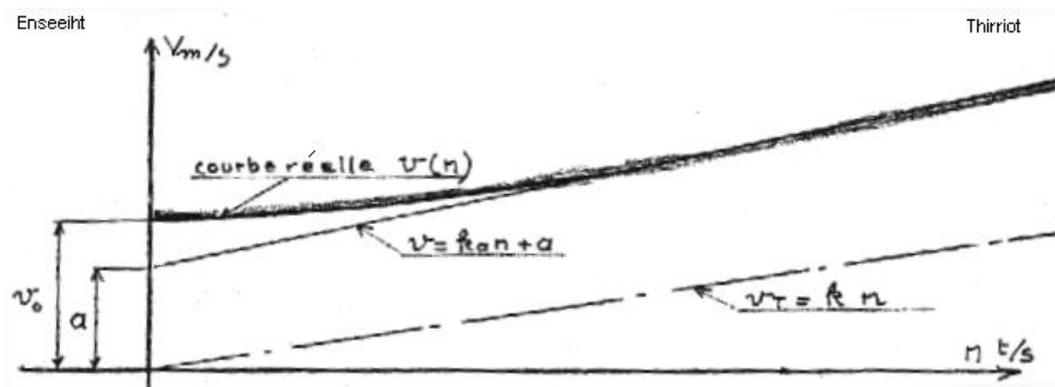
### • Courbe d'étalonnage

Elle est obtenue en mettant l'appareil dans un courant de vitesse connue. La courbe  $v(n)$  s'écarte de la forme d'une droite et apparaît comme une parabole plus ou moins aplatie qui coupe l'axe des ordonnées en un point correspondant approximativement à la vitesse de démarrage du moulinet.

En fait, dès que " $n$ " croît, la branche parabolique est assimilable à une droite d'équation.

$$v = k_a n + a$$

Cf. graphique infra



•**Défaut d'orientation** de l'axe du moulinet vis-à-vis de la direction du courant

La perche qui porte le moulinet est coudée en forme de manivelle pour permettre de donner à l'axe horizontal du moulinet un certain angle  $\alpha$  ( plus ou moins  $30^\circ$ ) par rapport à la direction générale du courant.

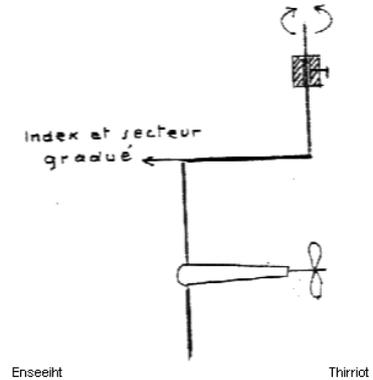
Dans ce déplacement, le moulinet reste horizontal à la même cote, son hélice reste au même point ; c'est simplement l'axe horizontal qui change de direction.

Voir croquis ci-contre

La nouvelle vitesse devient :  $V \cos \alpha$

cela entraîne des écarts de mesure car la poussée que reçoit

l'hélice s'avère plus importante.

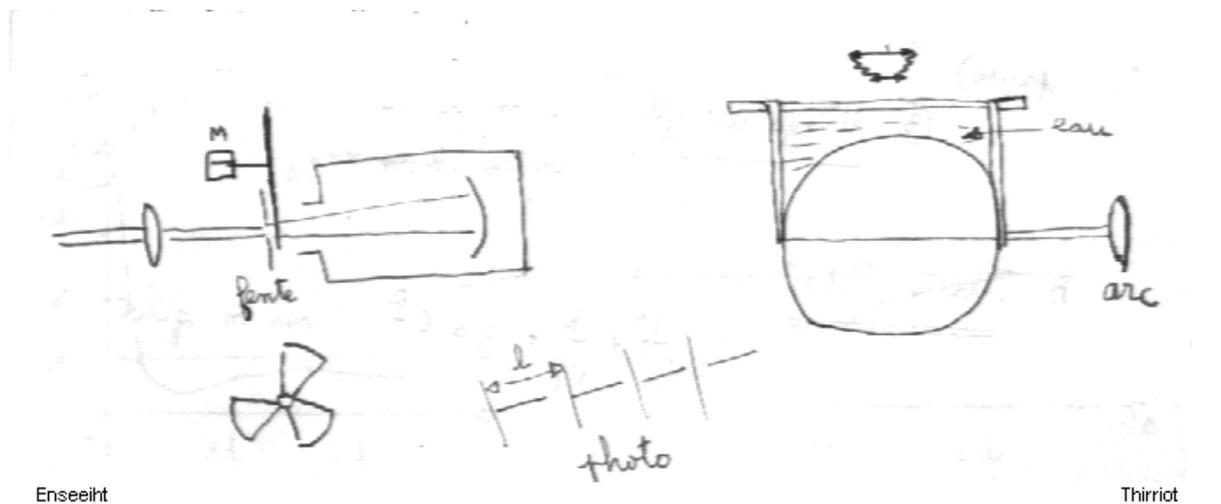


**3. 3 Autres méthodes**

En dessous de  $v = 10 \text{ cm/s}$  il devient difficile d'utiliser le moulinet. On emploie les méthodes infra.

**733.1 Chromatographie<sup>64</sup>**

On photographie des particules d'aluminium délayées dans de l'alcool et projetées dans l'eau. Ces particules sont éclairées par un faisceau de lumière intermittente.



Voir schéma infra

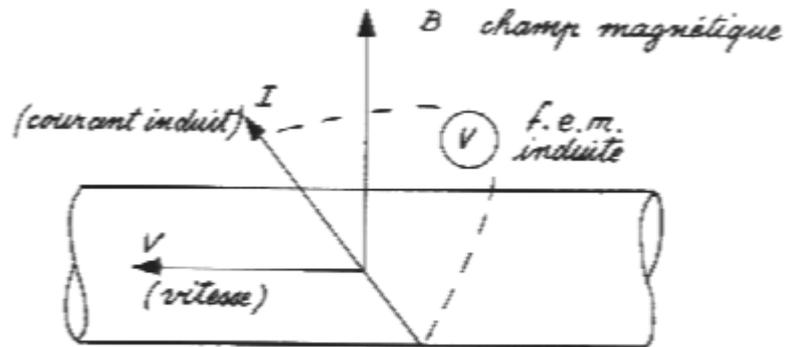
les particules lourdes tombent au fond; au milieu se trouvent des particules entourées d'air de même densité que l'eau. Au bout d'une durée  $\theta$  il se produit la "coupure"  $w = l$   
 $\theta$

<sup>64</sup>το χρώμα , -ατος : la couleur γράφω : écrire

les particules tombent alors au fond.

### 733. 2 Appareil électromagnétique

Il est utilisé dans les galeries. L'eau représente un conducteur en mouvement ; elle passe entre deux électrodes.



Agence de bassin

Autosurveillance

Un conducteur électrique de longueur  $l$  se déplaçant à la vitesse  $V$  dans un champ magnétique uniforme  $B$  induit une f.e.m. (force électromotrice)  $e$  telle que

$$e = B.l.V$$

la force électrique est  $f$  (vitesse de l'eau)

## 74 Jaugeage(mesure de débits) des écoulements à surface libre

### 74.1 Définition

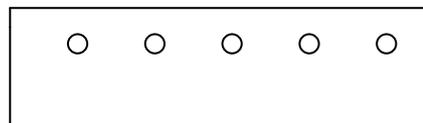
Jauger un cours d'eau, c'est trouver son débit<sup>65</sup> pendant l'unité de temps, c'est-à-dire trouver le volume qui passe pendant l'unité de temps dans une section donnée.

### 74. 2 Pouce de fontainier

Autrefois on utilisait cette unité, correspondant au débit par un orifice circulaire en mince paroi de 25,4 mm (1 pouce) percé dans un réservoir où le niveau d'eau était à 1,58 cm au dessus du centre dudit orifice.

Ce débit égalait.....13,3 litres/minute

La source à jauger débitait dans une caisse en bois percée de trous d'un pouce de diamètre, pour maintenir le niveau constant dans la caisse il fallait ouvrir un ou plusieurs trous .



Ce nombre mesurait en pouces de fontainier le débit

### 74. 3 Jaugeage par mesure des tirants d'eau (niveau)

Il concerne les sources ou les petits cours d'eau.

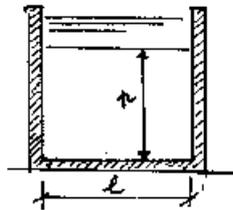
<sup>65</sup> Jusqu'au 19 ème siècle , au lieu de "débit", l'on utilisait " dépense d'eau "

**741. 1 Déversoir à mince paroi rectangulaire de Bazin**

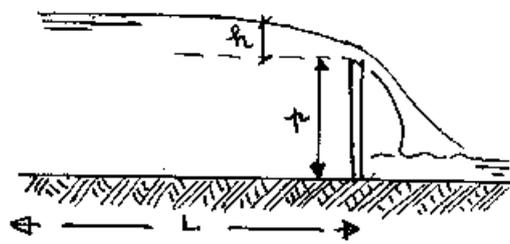
**•Caractéristiques :**

Il se présente selon le croquis infra

Le seuil doit être



Enseihnt



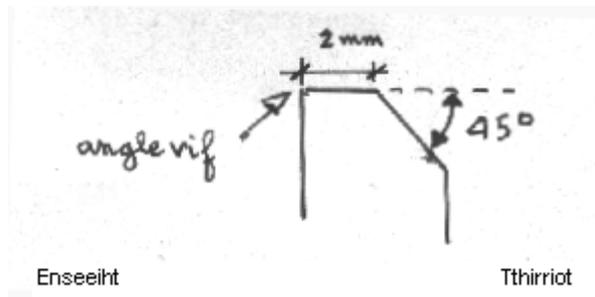
Thirriot

perpendiculaire au plan du fond du canal

La longueur à l'amont du déversoir doit être telle que  
 $L > 5 l > 20 h$

La partie amont de la paroi du seuil (pelle) ne doit pas être proéminente sur la paroi du seuil.

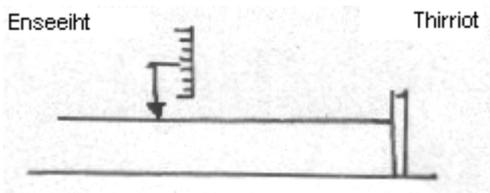
Cf. croquis ci-contre



Enseihnt

Tthirriot

La rugosité de la pelle en amont amène des écarts de 6 %, d'où nécessité d'une paroi lisse.



Enseihnt

Thirriot

Mais La détermination du zéro demande de la précision.

Voir croquis ci-contre

**•Formule et Courbe**

Elle est de forme :  $dq = u dw$

$$Q = \iint_{\omega} u dw$$

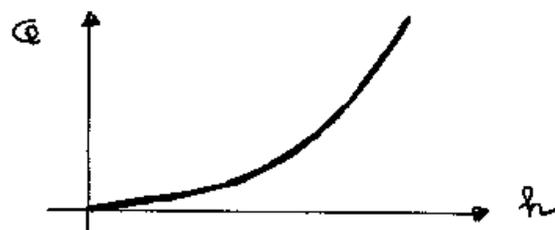
$$Q = m l \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$

l et h sont connus, m représente le coefficient de débit donné par l'expression

$$m = \left( 0,405 + \frac{0,03}{h} \right) \left\{ 1 + \frac{0,55}{h+p} h \right\}^2$$

avec  $0,10 < h < 0,60$  m  
 et  $0,20 < p < 2$  m

cf. croquis ci-contre



Enseihnt

Thirriot

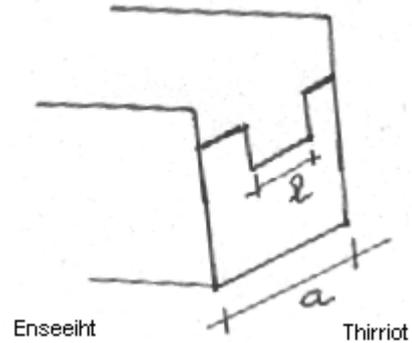
• Déversoir à contraction **latérale**

Si la charge  $h < 5$  cm, on utilise un déversoir à contraction latérale

Cf. croquis ci-contre

La formule de débit en ce cas s'écrit :

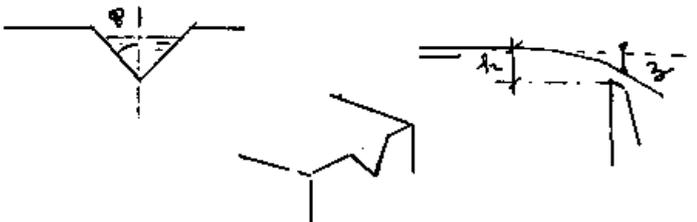
$$Q = 0,43 a \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$



**741. 2 Déversoir à mince paroi triangulaire de Thomson**

•Caractéristiques :

Si on a une charge encore plus petite, le déversoir rectangulaire à contraction latérale ne convient plus .



on emploie alors un déversoir triangulaire

Voir croquis ci-contre

L'ouverture varie ainsi :  $40^\circ < 2\varphi < 120^\circ$  , il donne une précision de l'ordre de 5 %

• Formule

On sait que :  $Q = \mu \iint_{\omega} v \cdot d\omega$  avec  $v = \sqrt{2g \cdot z}$   
par calcul on obtient

$$Q = m \sqrt{2g} \cdot h^{5/2}$$

le tableau infra donne les variations de **m** avec  $\varphi$

$2\varphi$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$	$105^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$
m	0,335	0,342	0,330	0,322	0,327	0,214	0,316	0,320	0,335

En 1861, Thomson a établi la formule suivante

$$Q \text{ l/s} = 0,014 h^{5/2} \quad 5 \text{ cm} < h < 18 \text{ cm}$$

•Courbe d'étalonnage

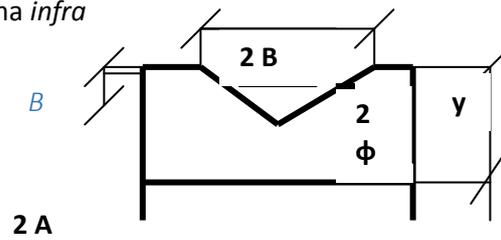
Elle a été établie à partir d'une mesure expérimentale sur un déversoir triangulaire à paroi mince, dont les dimensions sont précisées sur le schéma *infra*

$$2\varphi = 90^\circ$$

$$A = 15 \text{ cm}$$

$$B = 10 \text{ cm}$$

$$Y = 40 \text{ cm}$$



\* La charge  $h$  a été mesurée au moyen d'une pointe de mesure Neyrpic, avec une précision de 2/10 de mm. L'eau écoulée est recueillie dans un récipient à partir duquel elle est reprise par une pompe centrifuge et renvoyée dans un bac de 600 litres. On obtient le tableau des mesures *infra*.

Charge $h$ cm	Temps s	Volume reçue. l	Débit l/s	Débit moyen
8,78	167	571	3.419	3.433
	156	540	3.461	
	150	513	3.420	
8,15	240	652	2.716	2.752
	220	614	2.790	
	225	619	2.751	
7,73	270	651	2.411	2.415
	269	640	2.391	
	284	694	2.443	
7,32	320	674	2.106	2.097
	317	664	2.094	
	332	695	2.093	
6,75	349	605	1.733	1.729
	300	518	1.726	
	363	628	1.730	
6,38	379	574	1.517	1.514
	337	510	1.513	
	346	524	1.514	
5,97	510	650	1.274	1.277
	405	518	1.279	
	488	625	1.280	
5,18	738	669	0.906	0.898
	745	668	0.896	
	760	679	0.893	
4,28	1 200	684	0.570	0.575
	1 205	700	0.581	
	1 147	660	0.575	
3,16	1 345	385	0.286	0.281
	1 800	500	0.278	
	1 800	506	0.281	

1,99	3 600 2 195	391 223	0.108 0.101	0.104
------	----------------	------------	----------------	-------

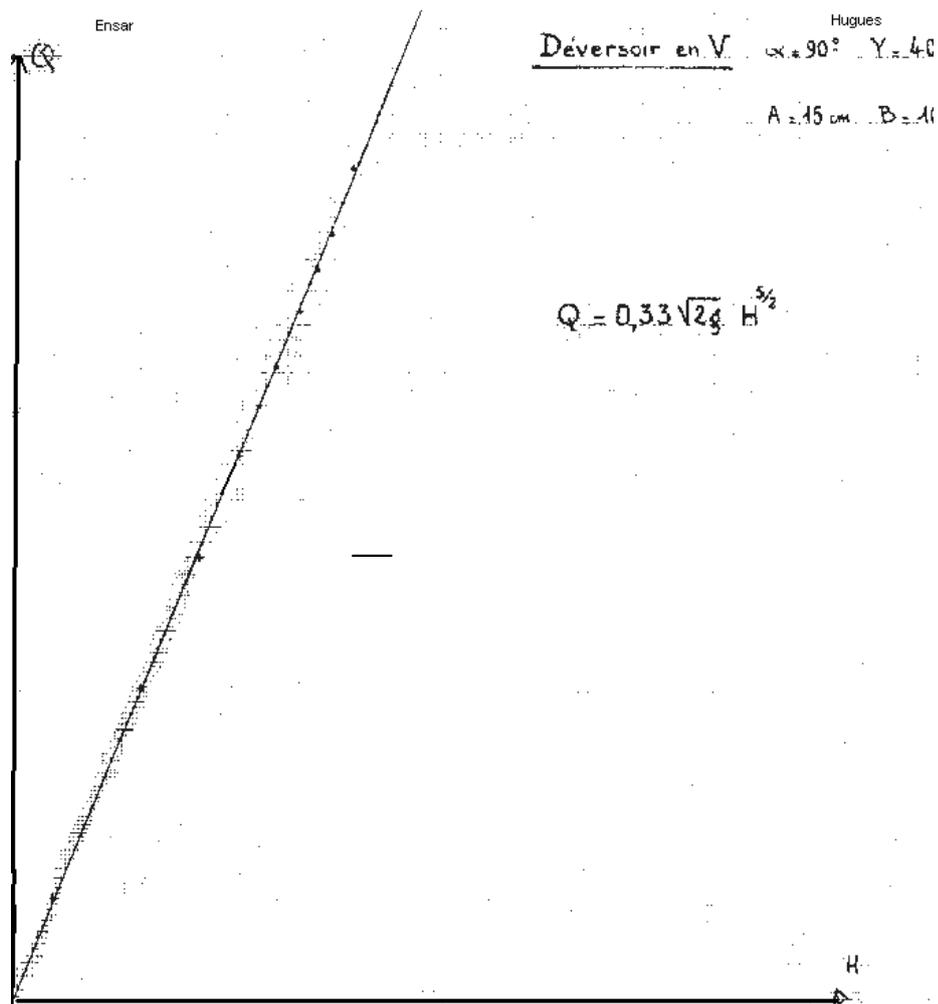
\* Sur un papier logarithmique on porte la charge h (en cm) et le débit correspondant Q (en cm<sup>3</sup>) en ordonnée. Les points expérimentaux se trouvent sur une droite, la loi de débit sera de forme

$$Q = k h^n$$

puisque sous forme logarithmique on avait

$$\log Q = n \log h + \log k$$

Voir graphique infra



La pente de la droite donne n  
il vient

n ≈ 2,5 donc 5/2

$$Q = k h^{5/2}$$

que l'on préfère écrire par analogie avec d'autres déversoirs

$$Q = m \sqrt{2g} h^{5/2}$$

\* Il reste à calculer m

$$\log Q = \log m + 1/2 \log 2g + 5/2 \log h$$

d'où

$$\log m = \log Q + 1/2 \operatorname{colog} 2g + 5/2 \operatorname{colog} h$$

or,

pour h = 6,75 cm on a Q = 1729 cm<sup>3</sup>

donc

$$\log m = \log 1729 + 1/2 \operatorname{colog} 2 \cdot 9,81 + 5/2 \operatorname{colog} 6,75$$

$$\log m = 1,51819$$

$$m = 0,33$$

La loi de débit pour le déversoir étudié est donc

$$Q = 0,33 \sqrt{2g} h^{5/2} \quad \text{avec } 2 < h < 9 \text{ cm}$$

\* Appréciations maintenant la précision de la mesure

erreur sur Q  $\frac{\Delta Q}{Q} < \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta t}{t}$  (V = volume)

$$Q = \frac{V}{t}$$

le volume recueilli est évalué à 2 litres près ; le niveau dans le bassin à 4 litres près  
donc  $V < 6$  litres

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{2}{6} = \frac{1}{3}$$

$$t = 600 \text{ } 100$$

A chaque arrêt du chronomètre on commet une erreur de 2/5 seconde pour certaines mesures, il faut plusieurs arrêts dus à la faible capacité de la cuve de réception

donc  $t < 2$  secondes  $\frac{\Delta t}{t} = \frac{2}{300}$

$$t = 300$$

d'où

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{1}{3} + \frac{2}{300} \text{ et } \frac{\Delta Q}{Q} = \frac{5}{300}$$

Erreur sur h

La pointe donne une précision de 1/10 mm, comme la mesure se fait par différence on a :

$$\Delta h < 0,02 \text{ cm}$$

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{2}{500}$$

$$h = 500$$

Donc avec

$$m = \frac{Q}{h^{5/2}}$$

$$\sqrt{2g} \cdot h^{5/2}$$

il vient

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{5 \Delta h}{2 h}$$

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{5}{300} + \frac{5 \cdot 2}{2 \cdot 500}$$

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{3}{100}$$

$$m = 100$$

donc  $0,32 < m < 0,34$

### 743. 3 Déversoir à mince paroi proportionnel de Morin

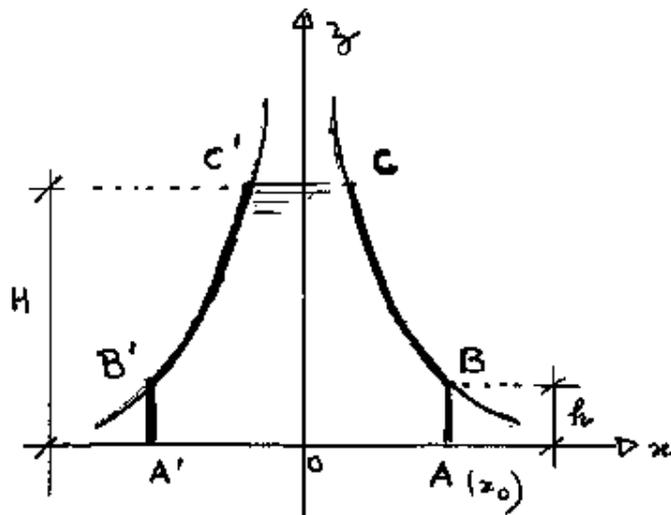
#### •Caractéristiques

Il est constitué d'une partie rectangulaire ABA'B' surmontée d'une partie curviligne définie par deux courbes CB et C'B' pour une charge motrice  $H > h$ .

Cf. croquis ci-contre

Ces deux courbes sont d'équation

$$z = \frac{A}{x^2 \sqrt{z}} \quad \text{ou} \quad x = \frac{A}{z^2 \sqrt{z}}$$



• **Formule et courbe**

Le débit Q sera égal à la somme de deux termes

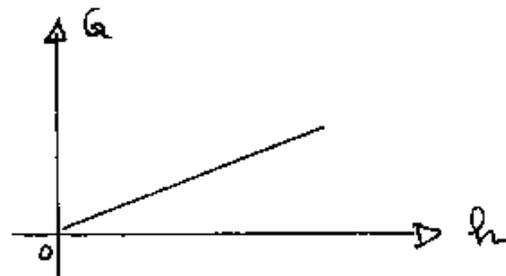
débit du rectangle  $Q_1 = 2 \sqrt{2g} \int_0^h \sqrt{H-z} . dz$

débit de la portion curviligne  $Q_2 = 2 \sqrt{2g} \int_h^H \sqrt{H-z} . dz$

Il vient finalement

$$Q = m \sqrt{2g} h$$

d'où la courbe ci-contre



Ensar

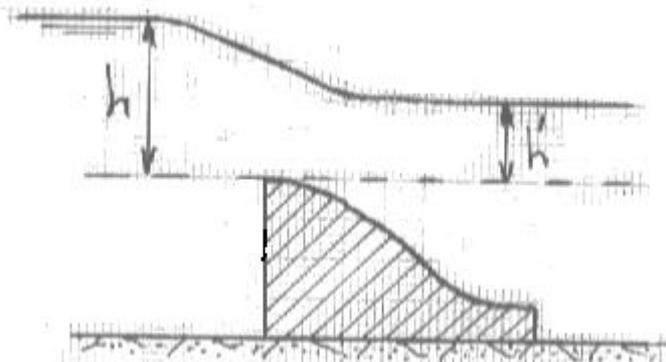
Hugues

**743. 4 Déversoir à seuil épais rectangulaire**

• **Caractéristiques:**

Sur les cours d'eau l'on peut aussi installer un seuil épais correspondant à une section calibrée dudit cours d'eau de manière à maintenir le tirant d'eau (hauteur) amont mesurable

& **Seuil à écoulement noyé**



La veine fluide s'écoule de façon noyée avec un régime fluvial à l'amont comme à l'aval

Cf. figure ci-contre

écoulement **dénoyé** avec un écoulement fluvial à l'amont et torrentiel à l'aval

Ce phénomène apparaît sur la photographie infra où l'on voit le ressaut puis le bouillonnement torrentiel à l'aval du seuil.

La photographie prise sur le Roubion, à Soyans (Drôme) montre le seuil épais recouvert par la veine fluide, l'armoire du limnigraphe et le tuyau où se trouve le flotteur. L'on remarque le bouillonnement du ressaut à l'aval du seuil donnant un régime torrentiel, ainsi que les galets laissés par les crues au premier plan.



Écoulement dénoyé du Roubion sur seuil épais

Soyans mars 1965

- **Le ressaut**

Selon le théorème de Bernoulli, la charge (ou énergie) en un point d'écoulement uniforme à surface libre s'écrit:

$$E = \frac{v^2}{2g} + h \quad (h : \text{cote au-dessus plan de référence})$$

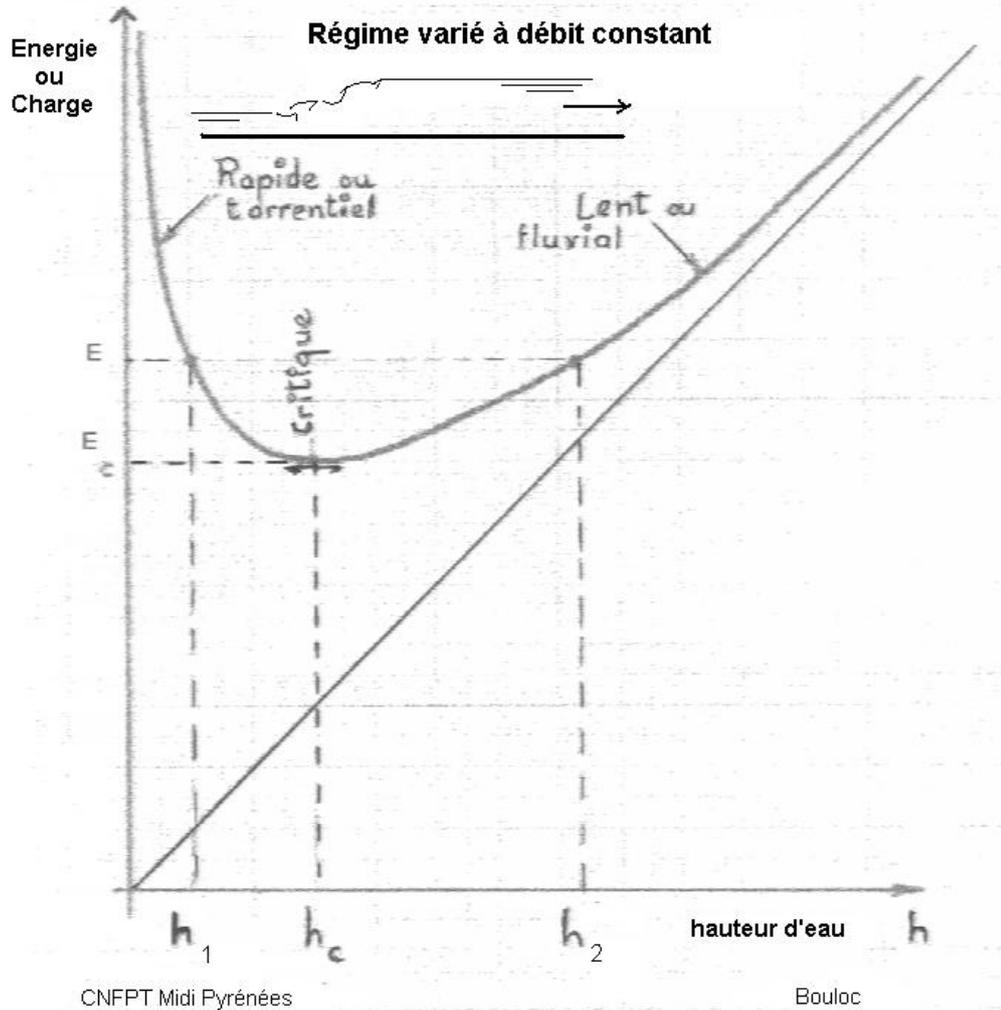
2 g

Dans un cours d'eau la "profondeur critique" correspond au passage d'un écoulement de type torrentiel (turbulent) à un écoulement de type fluvial (laminaire) ; elle est telle que :

l'énergie soit minimum pour un débit donné et le nombre de Froude = 1 soit :  $v = \sqrt{gR}$

puisque  $F = \frac{v}{\sqrt{gR}}$

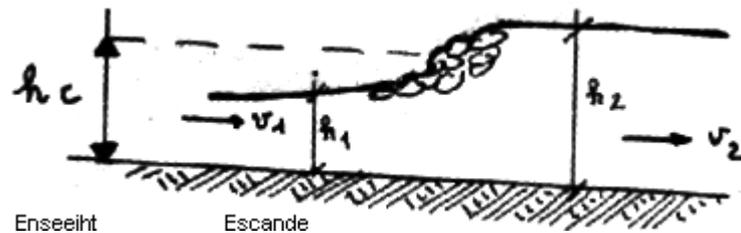
Cf. graphique *infra*



La traversée de la profondeur critique s'effectuant par une brusque variation de niveau,

comme l'indique

le schéma ci-contre



On passe de la ligne d'eau (1) torrentielle à la ligne d'eau (2) fluviale.

Si  $h < h_c$ , par exemple  $h_1$ , un tel mouvement reste indépendant de l'aval (l'aval ne réagit pas sur l'amont)

Le nombre de Froude  $F = v / \sqrt{gR}$  ( $R$  rayon hydrau.) caractérise l'influence de la pesanteur sur l'écoulement

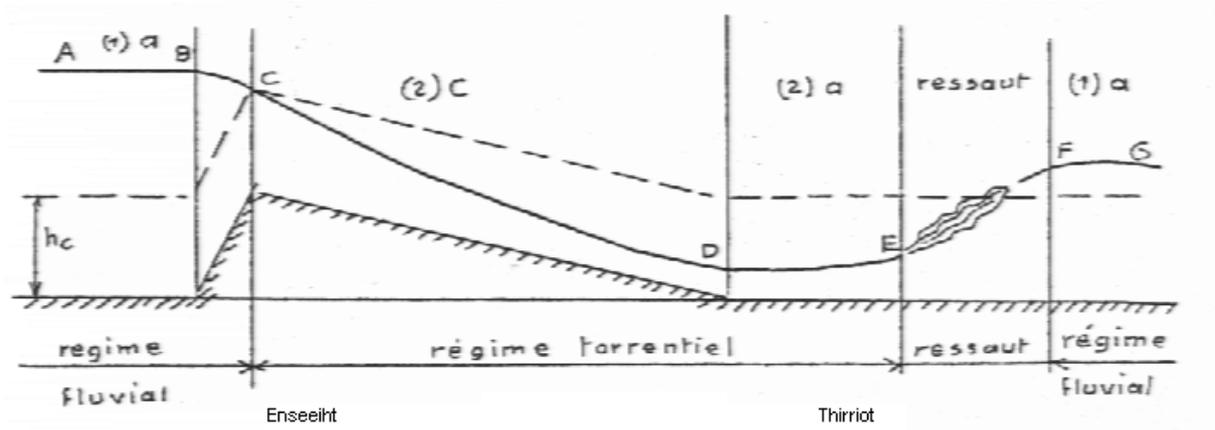
Si  $F \geq 1$ , la vitesse  $v$  est supérieure à  $\sqrt{gR}$ , énergie de position, donc régime torrentiel,

Si  $F \leq 1$ , la vitesse  $v$  est alors inférieure à  $\sqrt{gR}$ , énergie de position, donc régime fluvial

**N.B.** : la hauteur critique dépend des formes géométriques et non de la pente

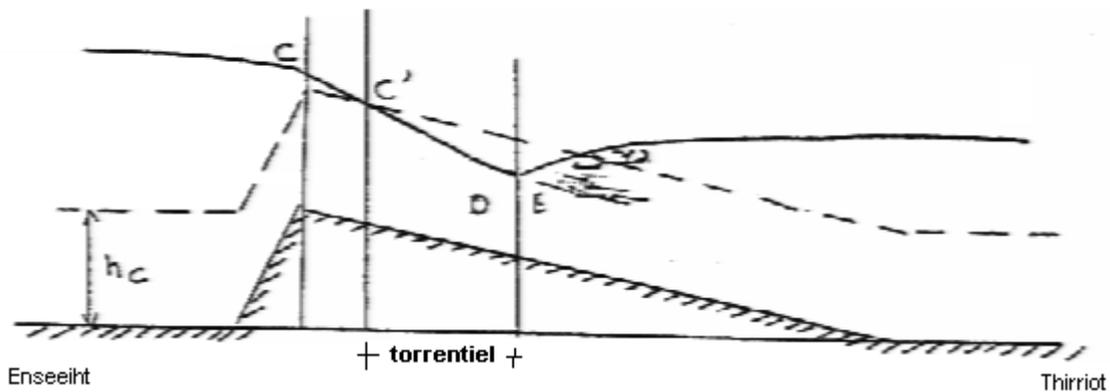
• Types d'écoulement

Selon la cote du niveau aval, le ressaut se déplacera entraînant divers types d'écoulement.



Écoulement dénoyé voir schéma *supra*

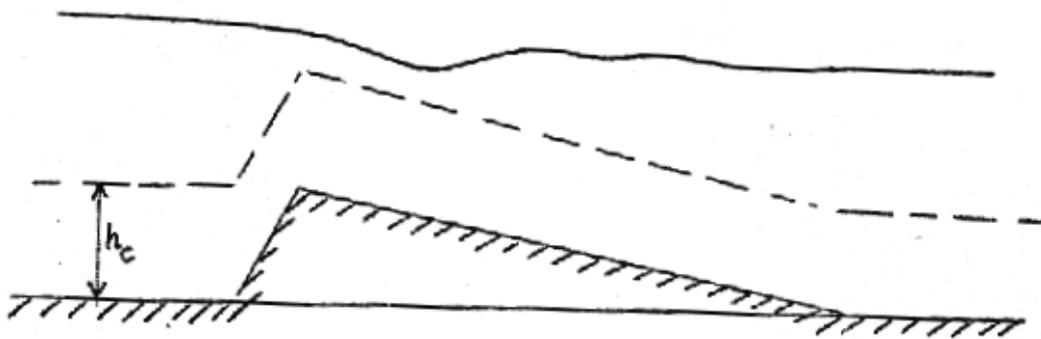
l'écoulement d'abord fluvial devient torrentiel avant de redevenir fluvial



Écoulement à veine noyée en dessous. Voir schéma *infra*

En raison du relèvement du niveau aval, D et E sont confondus sur la ligne d'eau L'écoulement à veine noyée en dessous est dangereuse pour le nageur

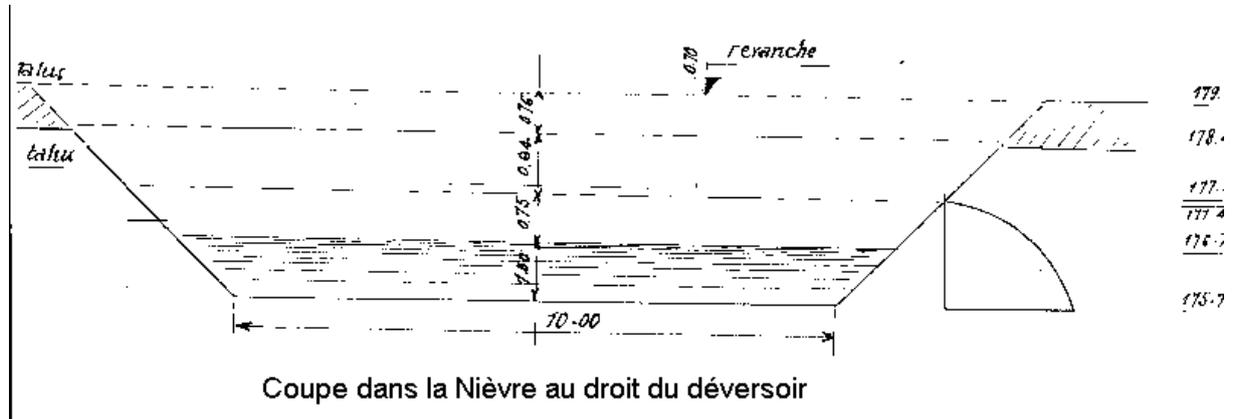
Écoulement à nappe ondulée cf. schéma *infra*



Quand le niveau aval a suffisamment augmenté, l'écoulement cesse de suivre le parement aval du seuil, pour venir en surface. En ce cas, toute variation du niveau aval se traduit sur le niveau amont.

•Application au déversoir de crue de la Nièvre

La Nièvre à la crue maximale débite  $20 \text{ m}^3 / \text{sec}$ , mais il faut aussi garantir un minimum de débit de  $3 \text{ m}^3 / \text{sec}$  ( car il s'agit d'un cours d'eau moulinois ) elle présente le profil en travers infra



Service de la Ville de Nevers

Grenot

Les contraintes supra permettent de déterminer le tirant d'eau qui doit rester après le déversement au déversoir de crue si s'élève à 40 cm donnant la cote du seuil à construire.

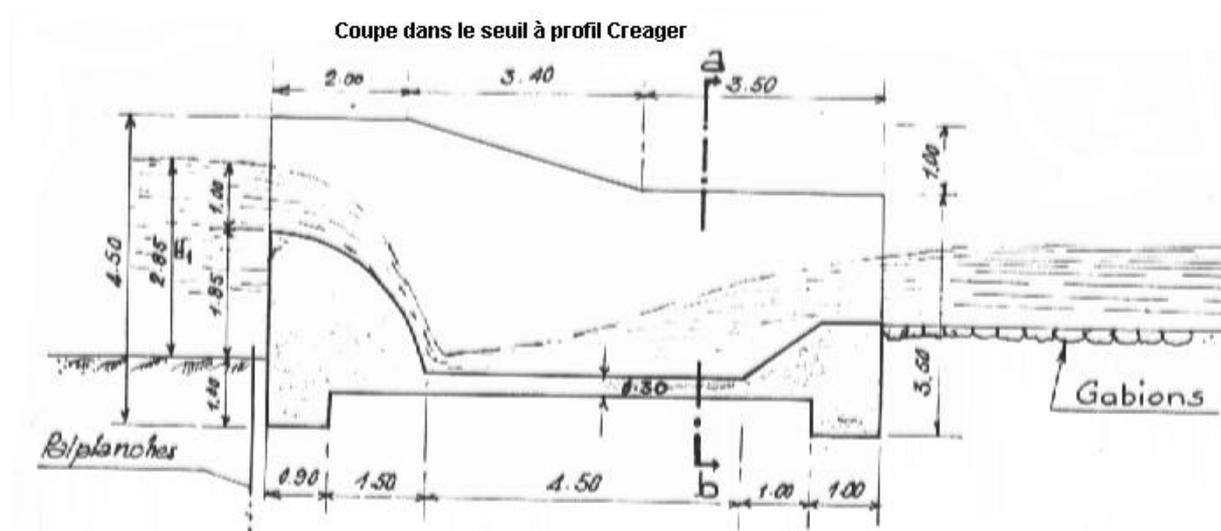
Selon le théorème de Bazin, le débit du déversoir s'écrit :

$$Q = m l \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$

Q en  $\text{m}^3 / \text{sec}$  , h en mètres hauteur de la lame déversante, l longueur du seuil exprimé en mètres

Il a été retenu un profil aval particulier pour le seuil le profil " Creager "

cf. coupe infra



Service de la ville de Nevers

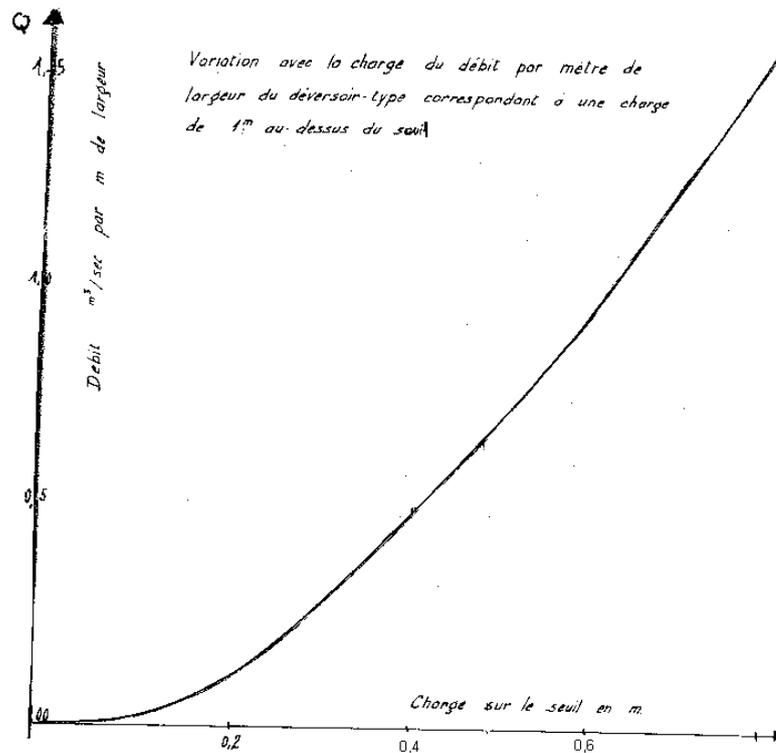
Grenot

Le parement aval est donc tel, qu'en tout point, la pression soit égale à la pression atmosphérique. Il ne se créera pas de dépressions locales (le courant colle à la paroi) et de plus, cela améliorera les conditions de débit selon le théorème de Bernoulli

$$\frac{v^2}{2g} + p + h + \xi = c^{te} \quad p \text{ restera } = 0$$

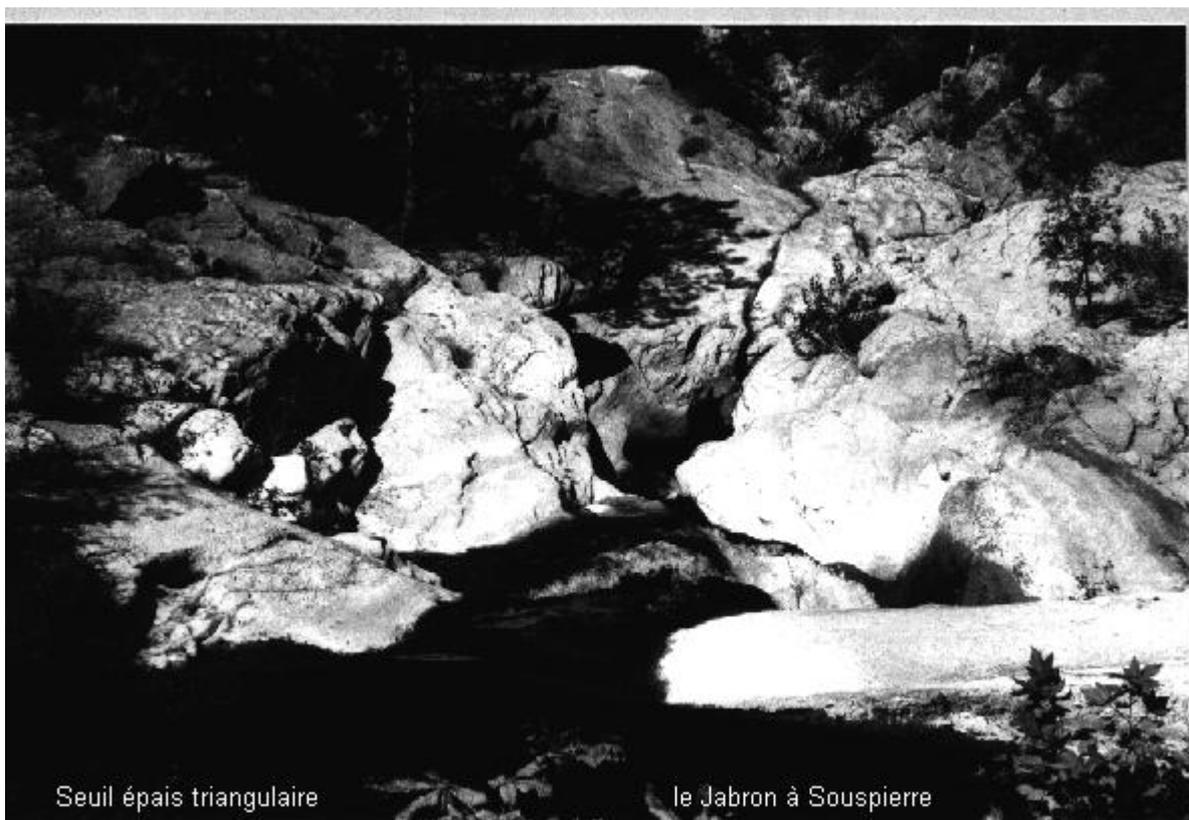
!g pg

Le débit sera représenté par la courbe infra



### 743. 5 Déversoir à seuil épais triangulaire

Quand le relief des rives le permet (étranglement) l'on peut construire un seuil de forme



Seuil épais triangulaire

le Jabron à Souspierre

triangulaire

La photographie supra prise sur le Jabron à Souspierre montre le seuil épais en forme de dièdre sis à l'aval du limnigraphe décrit précédemment.

• **Formule**

Elle s'écrit  $Q = m \sqrt{2g} \cdot h^{5/2}$  ( Thomson)

**743. 6 Déversoirs à seuils épais auto-jaugeurs**

• **Caractéristiques**

En 1932 dans le dessein d'éviter des étalonnages fastidieux et coûteux, un américain Parshall a imaginé de disposer d'une série de venturis<sup>66</sup> perfectionnés par l'adjonction de pente dont l'effet est d'accélérer encore l'eau dans la zone à écoulement torrentiel.

L'étalonnage étant effectué pour chaque dimension normalisée, il suffit de construire la réplique exacte pour pouvoir utiliser les courbes existantes.

On place cet appareil dans le fossé à jauger avec un raccordement *ad hoc*

. La photographie infra montre les deux débitmètres Parshall accolés de 9 pouces ( largeur de la



partie rétrécie)

A droite l'on constate une discontinuité de l'écoulement due au passage de la profondeur critique entraînant un ressaut (écoulement dénoyé) séparant l'écoulement fluvial amont de l'écoulement torrentiel aval.

A gauche la veine est dite "noyée en dessous " l'écoulement torrentiel très court et le ressaut minime

• **Formule**

La courbe de débit fournie par le constructeur correspond à

0,026

$$Q = 371,15 L (3,378 h_a)^{1,569} .L$$

$h_a$  : hauteur d'eau dans le puits amont figurant sur la photographie, ceci tant que le parshall est dénoyé ( figure de droite).

<sup>66</sup> Venturi, italien créa des ajutages convergent -divergent pour mesure dans les conduites forcées

L : largeur de la partie rétrécie qui reste  $< 0,7$  de la partie large du canal

Cette formule est représentée par une droite en coordonnées logarithmiques : débit =  $f(h_a)$   
Mais si le parshall présente un écoulement noyé (figure de gauche) ou ondulé (plus d'écoulement torrentiel) la hauteur d'eau aval joue un rôle et il faut apporter une correction indiquée par le constructeur.

#### 74. 4 Par mesure de rectification du diagramme des vitesses

Dès que l'on se trouve en présence d'un cours d'eau de quelque importance, les méthodes précédentes deviennent inapplicables ; l'on a recours à des mesures de vitesses à la surface par flotteur ( voir supra) ou à des mesures des vitesses à l'intérieur par moulinet ( voir supra).

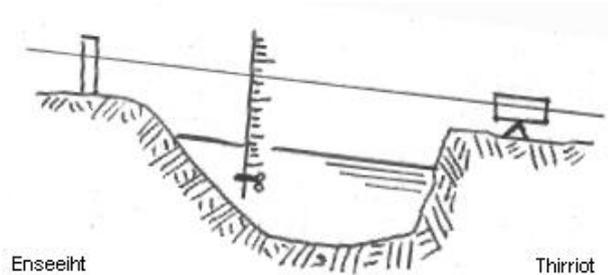
##### 744. 1 Application au jaugeage

###### • en rivière

La section étant connue, l'on peut déduire de la vitesse le débit à n'importe quel moment.

On déplace donc l'ensemble perche-moulinet . Pour obtenir une précision de 1 % il faut 6 points de mesure dans un plan vertical.

Cf. croquis ci-contre



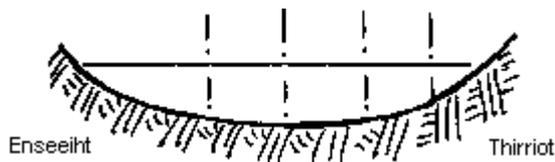
Il faut bien entendu connaître les caractéristiques géométriques de la section de mesure.

###### • en canal ou fossé

###### Dans une section quelconque

On met des perches et on déplace le moulinet dessus , lequel dispose d'un compteur totalisant le nombre d'impulsions pendant un temps donné.

Si l'écoulement est régulier, le temps nécessaire s'élève à .....100 secondes.



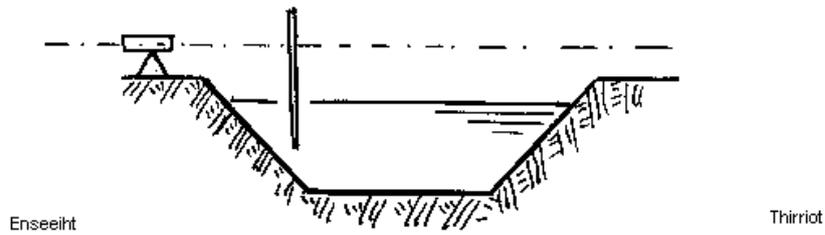
Cf. croquis ci-contre

###### Dans une section rectangulaire

On utilise une perche avec 6 ou 8 moulinets. On peut aussi travailler en faisant descendre le cadre avec une vitesse constante.

###### Dans une section trapézoïdale

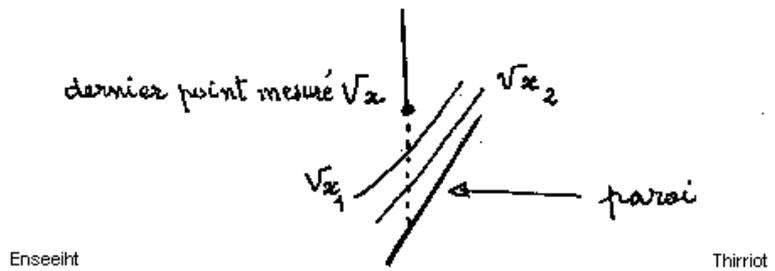
Il faut être certain de la verticalité, on vise avec un niveau. Le tirant d'eau doit être connu avec précision, surtout si le canal contient peu d'eau. Cf. schéma infra



Si les berges sont raides, pour éviter le heurt du moulinet sur les parois, le moulinet est levé avant.

Il faut alors extrapoler, on calcule  $v_{x1}$  et  $v_{x2}$ , courbes isodromes<sup>67</sup>,

f.schéma ci-contre



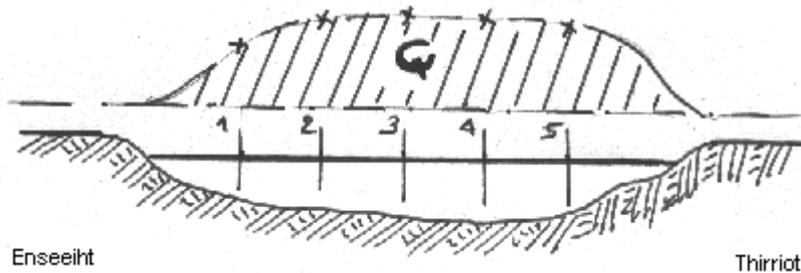
#### 744. 2 Calculs

##### •de vitesse:

$$v = k n + a \quad n : \text{nombre de tours de l'hélice} \quad \text{cf. cours supra}$$

##### •de débit

Par planimétrie de la surface on obtient les débits élémentaires et par une seconde planimétrie on obtient le débit total.



Cf. schéma ci-contre

L'on posera

$$Q = \iint v. dx. dy$$

ou

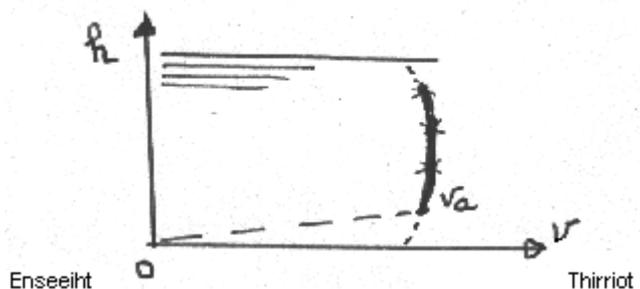
$$Q = \int_{x1}^{x2} dx \int_{y1}^{y2} v dy$$

Si le tirant d'eau est faible, on est contraint d'arrêter le moulinet avant que de toucher le fond donc à la cote a.

cf. graphique ci-contre

l'on mesure donc  $v_a$   
pour obtenir  $v_x$  entre a et le fond

<sup>67</sup>ἴσος : égal et ο δρόμος : la route



l'on posera :

$$v_h = v_a \cdot \frac{(x)^{1/n}}{(a)^{1/n}}$$

avec  $n = 5$  pour la terre,  $n = 7$  pour le béton

Cela permet d'extrapoler entre la cote  $a$  et le fond du canal.

#### 74. 5 Par mesure selon la méthode de dilution

##### 745. 1 Théorie

Cette méthode est utilisée depuis 1910. On injecte à débit constant  $q$  en AMONT une solution de concentration connue.....  $N_1$ .

Dans une section à l'AVAL, on effectue un prélèvement dont on détermine la concentration ..... $N_2$ . Soit  $n$  la concentration de l'eau en produit injecté

	eau	ajouté
il entre en amont	$n Q$	$N_1 q$
on retrouve en aval	$N_2 ( Q + q )$	

mais  $N_2 (Q+q) = nQ + N_1q$

$$Q = q \frac{N_1 - N_2}{N_2 - n}$$

et la concentration  $n$  est négligeable, et en aval  $N_2$  devient négligeable devant donc

$$y \quad Q = q \frac{N_1}{N_2}$$

##### 745. 2 Sels utilisés

###### •Critères

- Ne doit présenter aucune réaction avec l'eau
- Doit être stable à la lumière
- Doit être non toxique
- La concentration  $n$  dans l'eau doit rester faible
- Le titrage doit rester faible même avec un solution diluée
- Son prix doit rester raisonnable
- La coloration doit être suffisante

###### •Choix

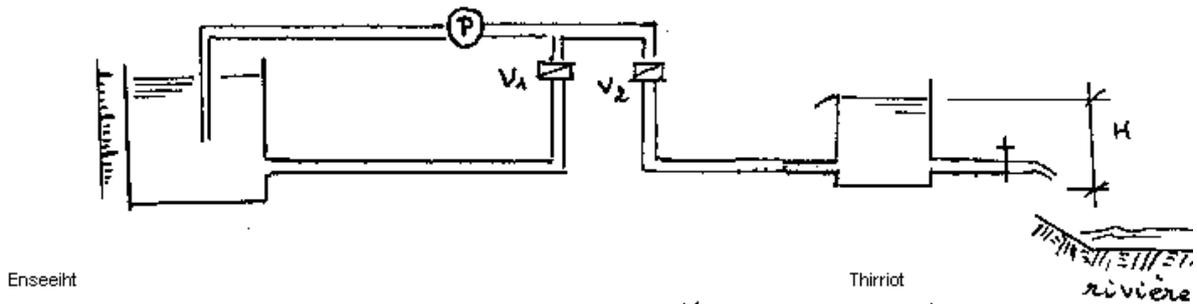
CINa a été abandonné, car il existe déjà du sel dans l'eau et son titrage devient imprécis si  $< 2$  mg/l  
On préfère :

ou  $C_{r2}O_7Na_2$  Bichromate de sodium  
CLi Chlorure de lithium

##### 745. 3 Appareillage

###### •Injection à débit constant

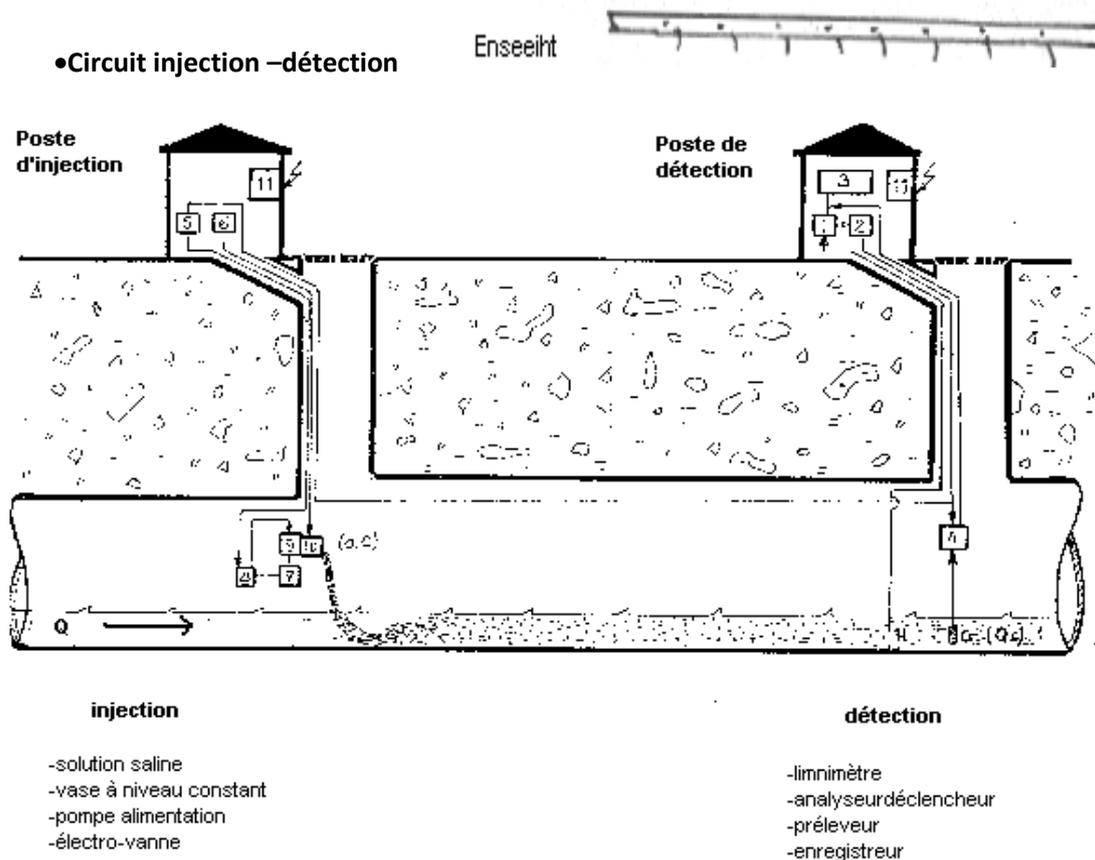
On dilue le sel dans l'eau de la rivière à l'intérieur d'un récipient ; de là, il rejoint un réservoir à niveau constant  $H$  d'où il est injecté dans la rivière via un diaphragme calibré Cf. schéma infra



On utilise une pompe volumétrique rotative, son débit sera constant si sa vitesse de rotation est constante.

Pour brasser, on ferme la vanne  $V_2$  et on réalise un circuit fermé dissolvant le sel dans le récipient.

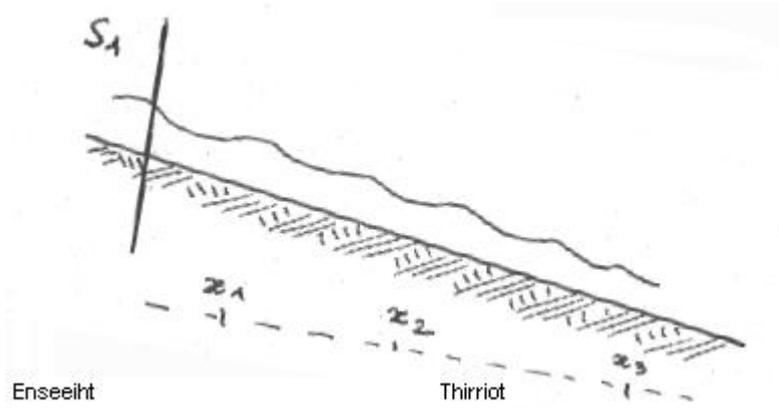
Pour injecter, on ouvre la vanne  $V_2$ , on lit une baisse de l'eau en f (temps). L'eau chargée de sel est injectée par une rampe sur toute la largeur du lit. Cf. croquis *infra*



Le schéma *infra* résume le système

•Choix des sections d'observation

Il ne faut pas de singularités, ni d'affluents, ni de bras, mais les chutes ne gênent pas.



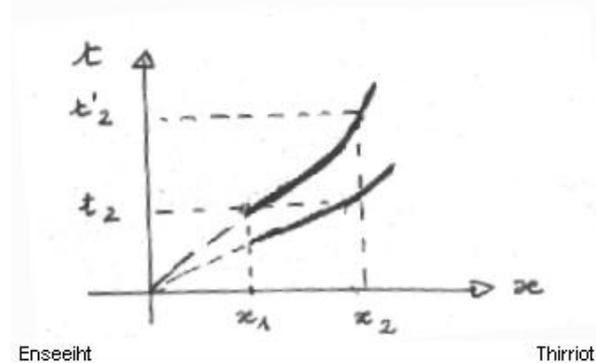
Cf. schéma ci-contre

On met des observateurs ex.  $x_1, x_2, x_3$  qui mesurent l'instant d'apparition du nuage coloré et celui de sa disparition, on emploie la fluorescéine pour colorer.

Cf. graphique ci-contre

en  $t_2$  : apparition du nuage,

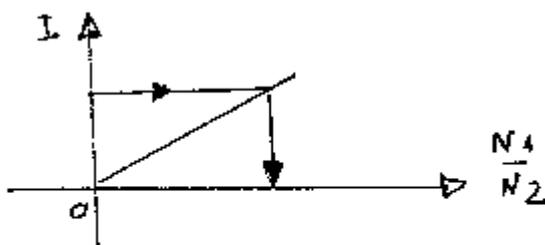
en  $t'_2$  : disparition du nuage



• **Mesure de la concentration**

On connaît le titre  $N_1$  de la solution injectée qu'on va mélanger à l'eau de la rivière. On prélève des

échantillons qui iront dans le colorimètre.



Une cellule photo-électrique intercepte l'écran constitué par l'échantillon de titre  $N_2$ , cela fait varier le courant électrique.

on connaît  $I$ ,

on obtient

$$\underline{N_1}$$

$N_2$

Enseeiht

Thirriot

Cf. graphique ci-contre

75 Mesures de débit solide

75.1 Généralités

Dans le cas du débit de charriage, si la couche de galets, graviers... devient trop fine, le débit cessera assez vite pour s'annuler ; il en sera de même pour le débit de suspension.

En raison des frottement variables, une partie du lit restera immobile, puis se déplacera et enfin s'arrêtera. Cela crée des sources d'erreurs pour les mesures ; les chiffres varient de... plusieurs centaines de %, d'où des mesures assez longues de 5 à 10 minutes.

Il n'existe donc pas de relation biunivoque entre les grandeurs hydrauliques et les mesures.

## 75. 2 Mesures globales du charriage et de la suspension

### 752. 1 Lacs

Dans le lac, le débit solide devient nul, l'on mesure donc l'augmentation des dépôts dans le fond du lac, ce qui permettra de déduire le débit.

### 752. 2 Rivière

On peut agir comme sur le lac, en draguant par exemple sur 50 m et observer ensuite les dépôts.

### 752. 3 Bassin-versant

Comme l'on connaît la superficie qui s'érode, on peut en déduire le débit solide, mais tout n'ira pas dans l'eau.

## 75.3 Mesures directes

### 753. 1 Charriage

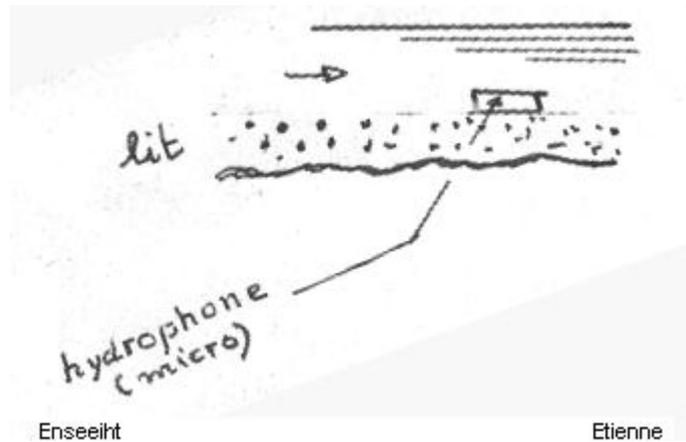
#### •Début de charriage

Il existe un seuil de vitesse au-delà duquel commencera le transport. Pour le déceler on pose un hydrophone<sup>68</sup> au fond de l'eau

lorsque le déplacement commence,

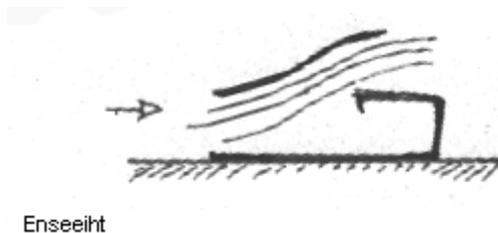
on entend des chocs.

Voir croquis ci-contre



#### •Utilisation de nasse

On place une boîte au fond de l'eau et l'on attend qu'elle se remplisse



Cf. croquis ci-contre

<sup>68</sup> το ύδωρ - υδατος = l'eau η φωνή = la voix

Le débit solide obtenu < débit solide réel  
l'efficacité est estimée ainsi  $\eta = \frac{G_{\text{capté}}}{G_{\text{réel}}} = 50\%$  en général

$$G_{\text{capté}} = \frac{\text{poids}}{\text{temps}} \quad G : \text{débit solide}$$

il ne faut pas que la nasse soit trop pleine.

### 753. 3 Suspension

#### •Théorie

Les grains se déplacent à la même vitesse que le courant

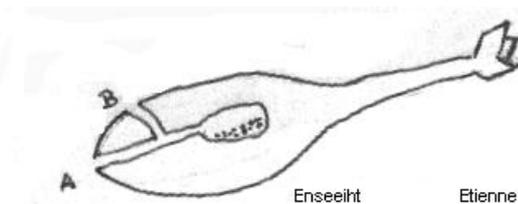
$$G = \iint c.v. d\omega \quad c = \text{concentration}$$

$$\omega = \text{section}$$

Le prélèvement ne doit pas modifier la concentration, il faut donc que la vitesse de prélèvement  $w$  ait la même valeur que la vitesse du courant  $V$ .

#### •Mesures instantanées par bouteille ou turbidisondes

On peut plonger et retirer instantanément une bouteille, mais on préfère employer des bouteilles en fonte, appelées turbidisondes.

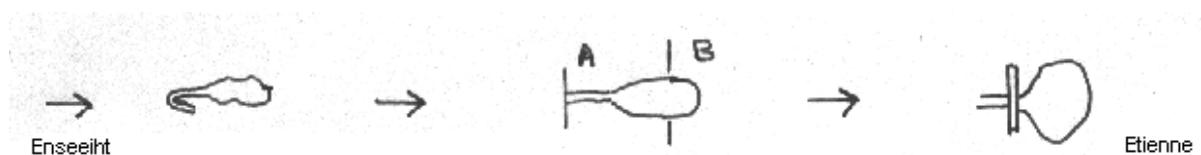


Cf. schéma ci-contre

Pour les grains fins, à répartition uniforme, une seule mesure suffira. Si les grains sont plus lourds, il faudra pratiquer plusieurs mesures et au fond de l'eau de préférence.

#### • Mesures instantanées par baudruche + canule

On enlève l'air, canule vers l'aval ; cf. schéma infra



Puis après, on place la canule vers l'amont,  $p_A = p_B$   
on retourne la canule et on sort le ballon.

La vitesse =  $\frac{\text{volume d'eau}}{\text{temps}}$

#### • Précision des mesures instantanées

Il existe des fluctuations dans le débit solide qui, par mesures instantanées ne peuvent être saisies, par exemple à cause des tributaires du cours d'eau.

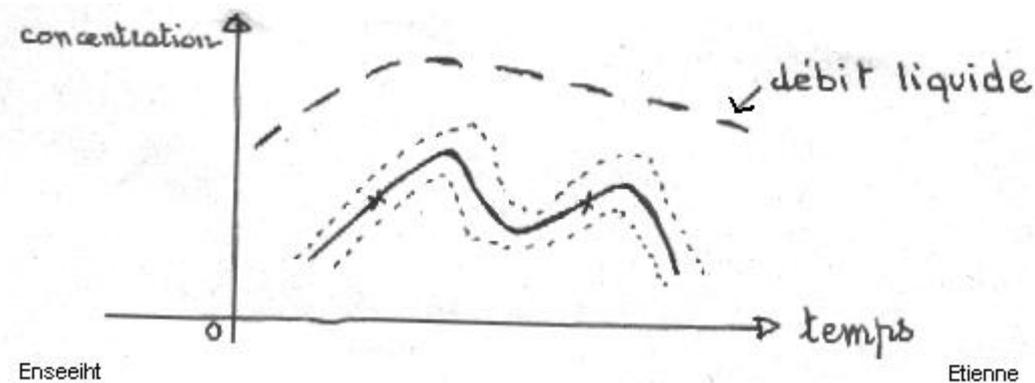
#### • Mesures continues

Le choix du point de prélèvement s'avère fondamental. Il faut définir une concentration moyenne

$$\underline{G} = C_{\text{moyen}} \quad G = \text{débit solide}$$

$$v \cdot \omega$$

On dessèche et on pèse le résidu solide, on peut aussi se baser sur la variation de densité.  
Il vaut mieux avoir beaucoup de points faux, que deux points justes, car on connaît la forme de la courbe.



Voir : le graphique ci-contre

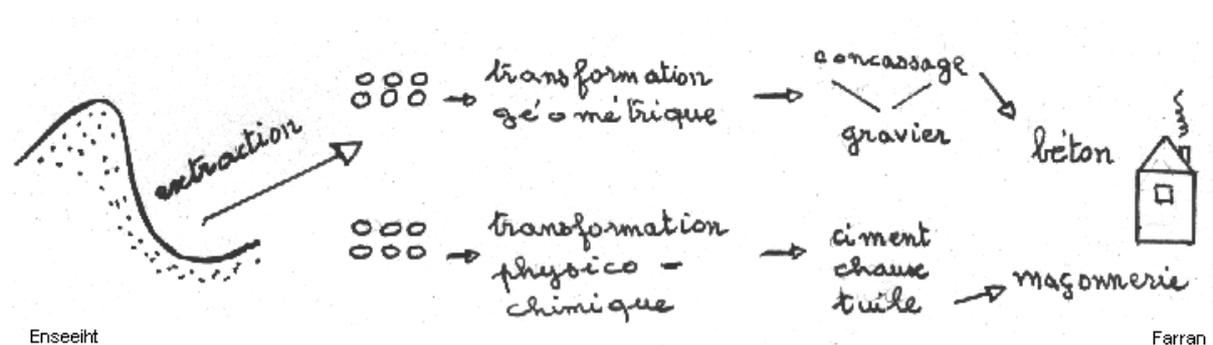
## 8 Le sol

Λέγεται ότι για να καλλιεργηθεί σωστά η γη στο μέλλον πρέπει πρώτα να γνωρίζουμε τη φύση του εδάφους.

Ξενοφών<sup>69</sup>

### 81 Les usages du

#### 81. 1 Sol considéré comme source de matériaux de construction



Selon le schéma supra, on voit que par extraction, l'on tire du sol des matériaux qui, par des traitements différents, permettent l'édification d'une maison.

#### 81. 2 Sol considéré comme appui

Au début, on construisait sur des bases solides, puis par manque de place, on a construit sur des sols mous.

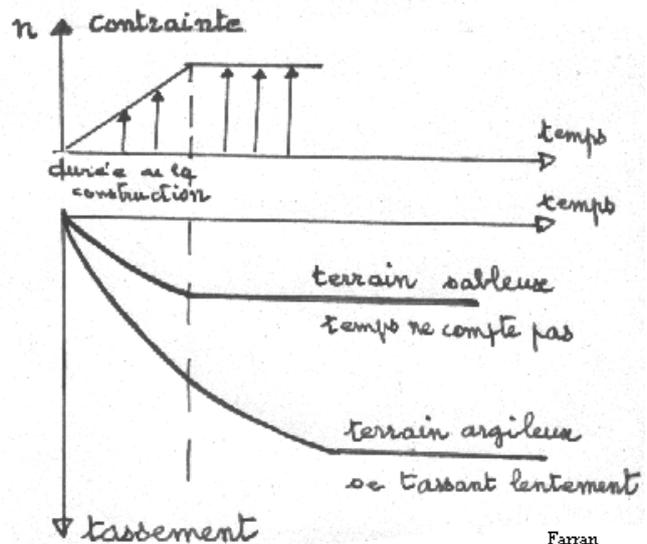
Les constructions entraînent des contraintes supplémentaires sur le sol, ce dernier réagira :

- soit par tassement, phénomène lent (fissuration)
- soit par rupture, glissement brutal (effondrement)

Le tassement est dû aux mouvements de l'eau incluse dans le sol. La durée du tassement est représentée par le temps qui s'écoule entre la mise en charge et le moment du tassement total.

<sup>69</sup> "Il apparaît que pour cultiver convenablement dans l'avenir, il faudra connaître d'abord la nature du sol " Xénophon, 427- 353 *ante Jesum Christum*, général athénien qui conduisit la retraite de l'armée grecque depuis l' Irak jusqu'en Arménie, il narra cette odyssee dans le livre " l' Anabase"

- le temps de tassement restera fonction de la perméabilité
- pour la tour de Pise, le tassement total ne se trouve point encore atteint,
- ces phénomènes de tassement furent étudiés par le hongrois Terzaghi



Enseeiht

Farran

### 81. 3 Sol considéré comme voie de passage

Il est utilisé pour les routes, les tunnels

### 81. 4 Sol considéré comme terre arable<sup>70</sup>

Nous le définirons avec l'agronome Demolon ( 1881 - 1954 ) comme : " Une formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous jacente par l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques".

Il s'agit donc d'une conception dynamique du sol, qui, dans ce cas, dépend : de la roche, du climat, du temps, du relief, des organismes.

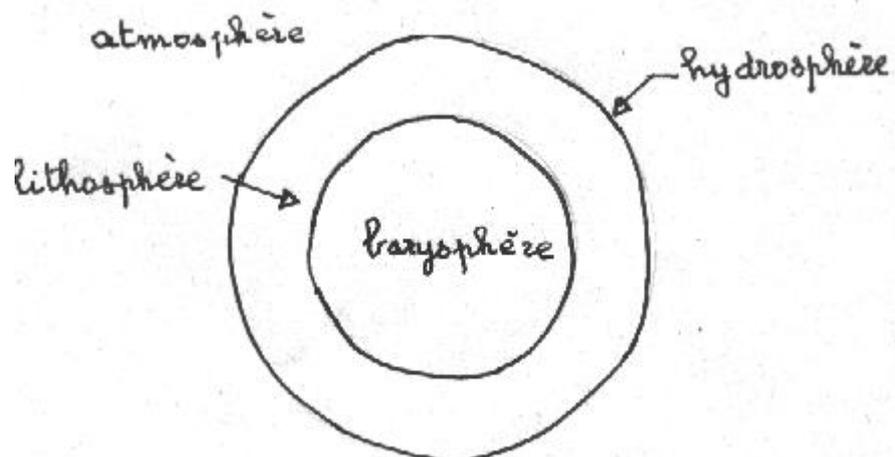
## 82 La genèse du sol

### 82.1 Le globe terrestre

#### 821.1 Dimensions

Son rayon atteint 6.700 km ,  $d_{\text{terre}} = 5,5$  mais la densité du sol  $d_{\text{sol}} = 2,7$ . Il est composé de différentes parties.

Cf. schéma ci-contre



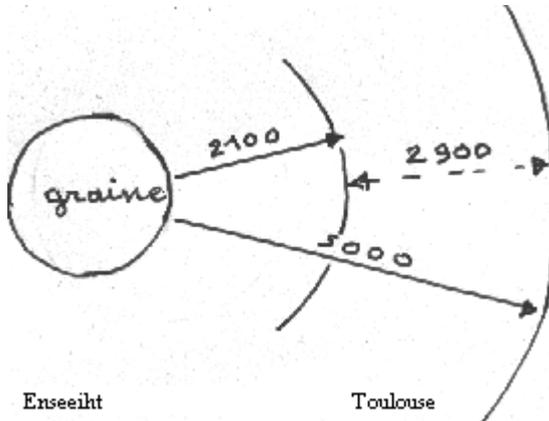
Enseeiht

Farran

<sup>70</sup> Du latin arare : labourer

Près du sol se trouverait l'enveloppe à laquelle succéderait le noyau, lui-même enserrant la graine située

à ..... 5.000 km de la surface.



Cf. schéma ci-contre

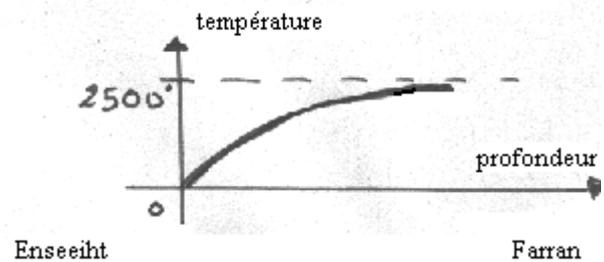
### 821.2 Gradient thermique

La température de la terre augmente avec la profondeur. Le nombre de mètres dont on descend pour que la température augmente de 1° s'appelle le degré géotechnique d°

d° = 33 mètres

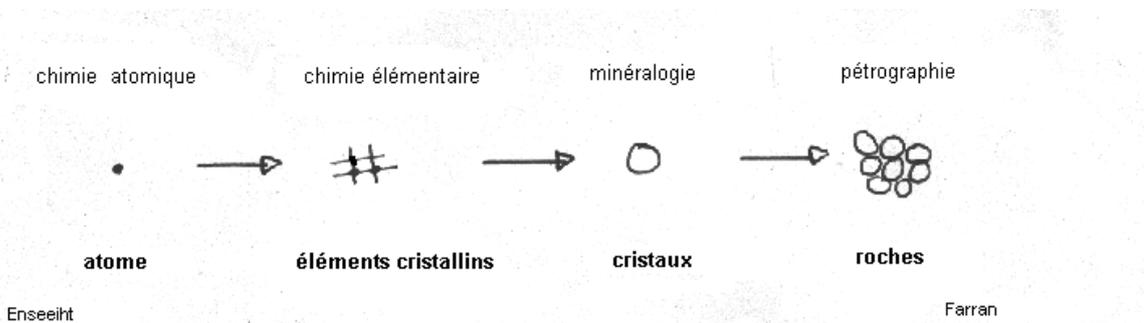
On pense que cette augmentation tend vers une asymptote de température vers 2500°

cf. graphique ci-contre

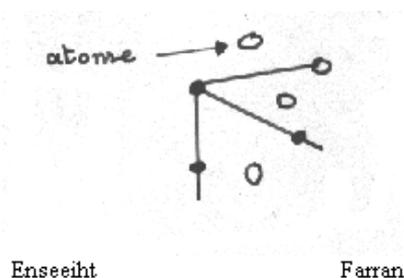


### 82. 2 La chaîne de constitution du sol

Elle est constituée selon le schéma infra

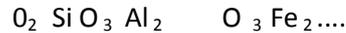


Les atomes sont groupés dans un élément cristallin par exemple : Si , Ca ....



Cf. schéma ci-contre

Ces éléments cristallins se groupent entre eux pour donner des cristaux ou minéraux, qui résultent d'association des groupements chimiques :



Ces minéraux se groupent entre eux pour donner des roches et l'on arrivera à la géologie.

### 82. 3 Minéralogie

Les cristaux ou minéraux sont constitués d'association de groupement chimique

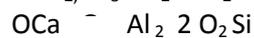
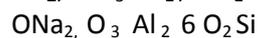
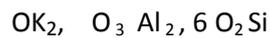
#### 823. 1 Minéraux primitifs

Ils ont été formés en même temps que la couche, lors de la formation magmatique.

Parmi ceux-ci, l'on citera :

le **quartz**, avec : la calcédoine  $O_2 Si$   
l'opale, le silex  $O_2 Si, n OH_2$

le **feldspath** : cristal de trois alumino-silicate



le **mica** ne représente que 4 % des cristaux, mais il possède des propriétés diélectriques, il se clive en lamelles, il s'agit d'un lubrifiant possible.

#### 823. 2 Minéraux secondaires

Ils ont été formés APRES la mise en place de la roche par altération ; l'eau reste un agent actif de cette altération.

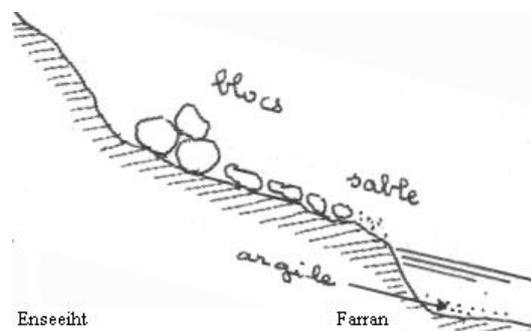
Minéraux existants +  $OH_2 \rightarrow$  minéraux d'altération

L'eau agit chimiquement (dissolution) physiquement (gel) et mécaniquement (érosion).

• **Insolubles** dans l'eau

Ils se déposent selon le poids

Cf .croquis ci-contre



En ce qui concerne **l'argile**, le minéral préexistant est le feldspath

\* en pays tempéré l'on assiste à une "kaolinisation du feldspath"  $O_3 Al_2, O_2 Si$

\* en pays tropical l'on assiste à une "latérisation"  $O_3 Al_2 n OH_2$

•Solubles dans l'eau

R

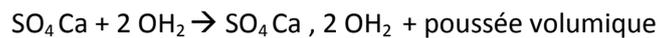
Parmi ceux-ci, l'on notera

les **carbonates** tels que : calcite, aragonite  $\text{CO}_3 \text{Ca} - \text{O}$  et la dolomite<sup>71</sup>  $\text{CO}_3 \text{Ca CO}_3 \text{Mg}$ . On les rencontre en MASSIFS par exemple au Tyrol italien la région des alpes dolomitiques .

les **sulfates** tels que l'anhydrite  $\text{SO}_4 \text{Ca}$  et le gypse  $\text{SO}_4 \text{Ca}, 2 \text{OH}_2$ . On les rencontre en BANCS. Il existe un banc d'anhydrite dans les Alpes.



Avant, la densité était celle de l'eau  $d = 1$  ; sous le poids de l'anhydrite formé dans la lagune, une fissuration très importante se produit où passera le magma. Ce banc d'anhydrite passera entre l'Arc et l'Isère.



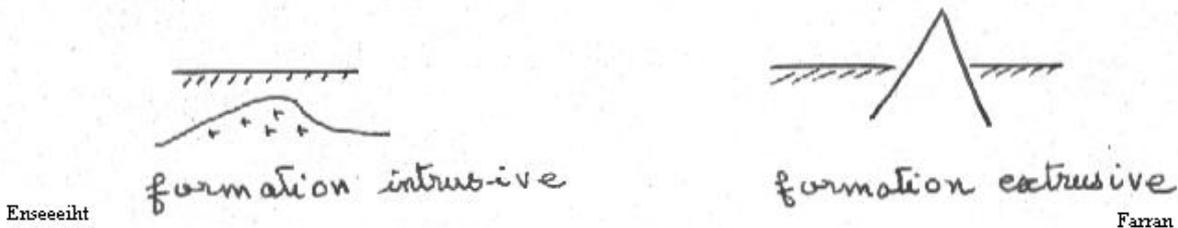
la poussée atteint  $6 \text{ kg/cm}^2$ , car l'anhydrite se dissout avant que de devenir du gypse.

**82. 4 Pétrographie**<sup>72</sup>

Les roches sont constituées par des associations de minéraux ; elles sont classées selon leur origine.

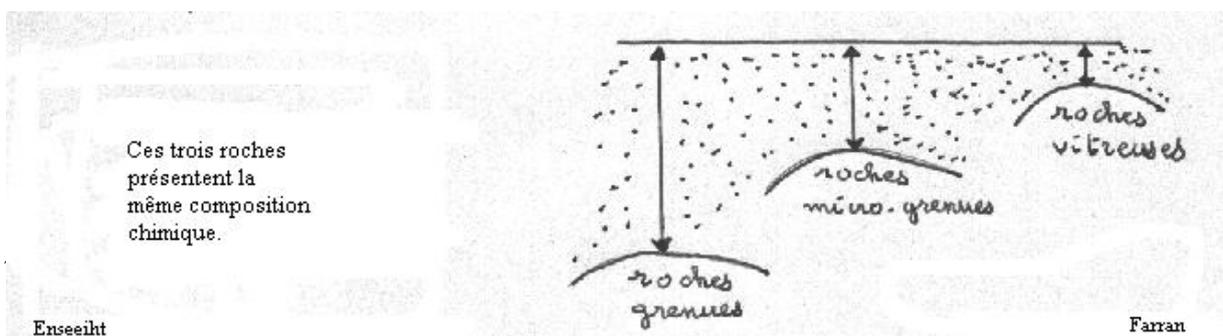
**824. 1 Roches magmatiques ou éruptives**

- Position de la fissure par rapport à la surface cf. croquis infra



Les formations intrusives ont le temps de se cristalliser, alors que le refroidissement brutal des formations extrusives donne des verres.

- Profondeur de mise en place cf. croquis infra



Le **granit** (quartz + feldspath + mica) contient 60 à 80 % d'O<sub>2</sub> Si, il constitue l'exemple type de roches grenues. Il s'altère à l'air par infiltration d'eau dans les fissurations ; il se crée alors un chaos qui se désagrège en gore puis donne une arène<sup>73</sup>. Cf. croquis *infra*



### 824. 2 Roches sédimentaires

Sur les seize premiers mètres depuis la surface de la terre, 75 % des roches sont classées parmi les sédimentaires qui correspondent à une altération des roches préexistantes, laquelle se produit de la manière suivante

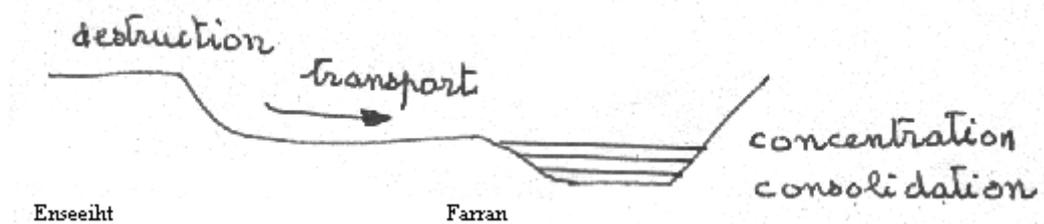
#### • Destruction

Elle est due à des actions chimiques (eau), biochimiques (organismes) ou physiques (gel, soleil).

#### • Transport à l'état solide

Les matériaux se déposent, et les plus petits vont le plus loin.

Cf. schéma ci-contre



\* Sédiments non consolidés. On citera :

blocs, cailloux, gravier, sable, limon, loess, vase.

**Loess** : quartz, calcite, argile - **Limon** : quartz, argile - **Vase** : argile

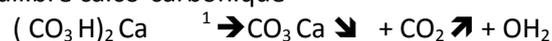
\* Sédiments consolidés. On citera :

le **grès** constitué de grains siliceux à ciment siliceux (sable)

la **marne** constituée de grains calcaires à ciment argileux

#### • Transport avec mise en solution

Il est fondé sur l'équilibre calco-carbonique

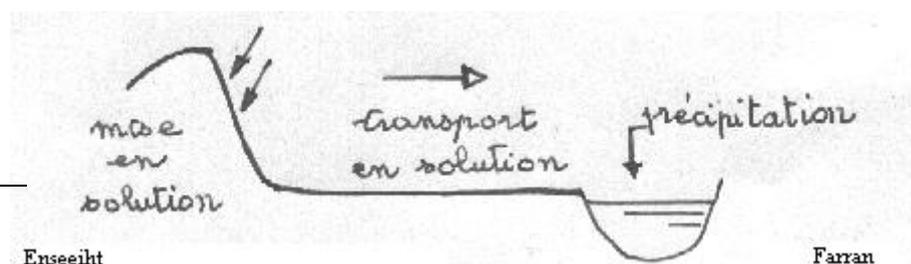


←<sup>2</sup>

bicarbonate soluble

carbonate insoluble

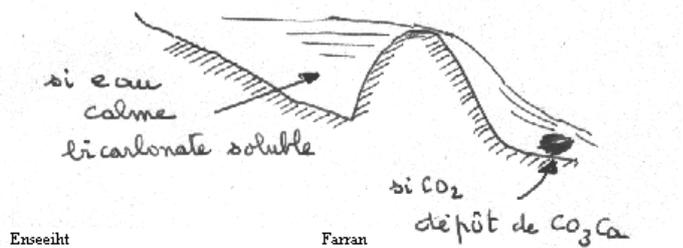
Cf. schéma ci-contre



<sup>73</sup> du latin arena, -ae : sable

Soit des roches de surface contenant du calcaire.

- \* en région froide, le  $\text{CO}_2$  est plus soluble à froid,  $\text{CO}_2$  rentrera dans le second membre, l'équation évoluera dans le sens 2 pour faire disparaître cet apport de gaz carbonique.
- \* en région chaude,  $\text{CO}_2$  se dégage, donc l'équation évoluera dans le sens 1 donc précipitation de calcaire. En bord de mer, on constate la formation continue de roche calcaire.



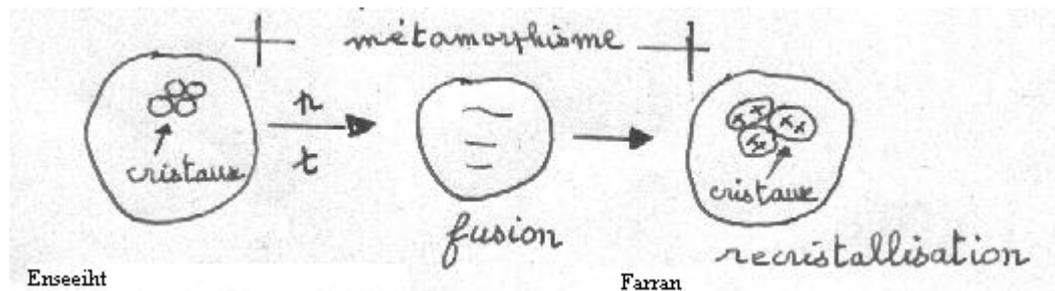
Les polypies (coraux) utilisent  $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$  pour fabriquer leurs coquilles en  $\text{CO}_3\text{Ca}$

Cf. croquis ci-contre

### 824. 3 Roches métamorphiques

#### • Le métamorphisme<sup>74</sup>

Il s'agit d'une évolution en profondeur par le jeu de la pression et de la température des roches magmatiques ou sédimentaires selon le schéma infra.

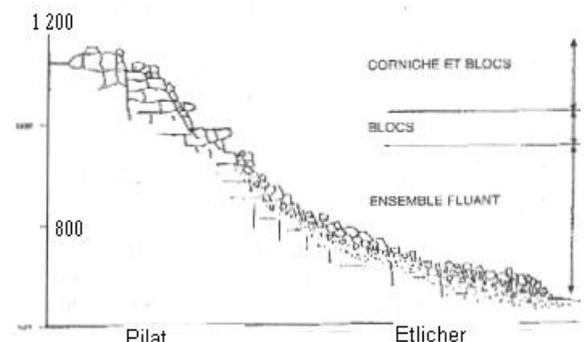


#### • Exemples :

\* le **gneiss** des chirats sur les pentes du Mont Pilat de couleur claire à grains fins il constitue de véritables traînées de pierre descendant les talwegs, sans fines donc sans végétation.

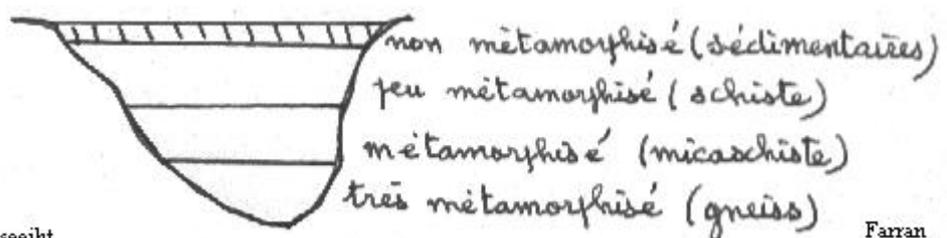
Leur origine pourrait se trouver dans la chute par gravité des roches à cause de la gélivation

cf croquis ci-contre (chirat de St Sabin)



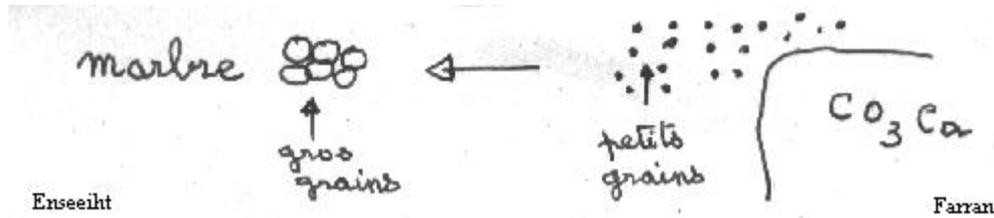
Origine du **gneiss** ; il présente les mêmes éléments que le granit, mais en désordre (quartz, feldspath, mica). Il provient des grandes profondeurs,

Cf. schéma ci-contre



<sup>74</sup> μετά : de nouveau et η μορφή : la forme

\* le **marbre blanc** ( roche métamorphique) est constitué de calcaire pur recristallisé selon le schéma



infra

Le marbre noir contient en plus de charbon.

N.B. le nom et l'âge d'une roche ne donnent pas plus d'indication sur la roche que le nom et l'âge d'une personne sur son caractère.

### 83 Critères concernant le sol

Le sol est composé de substances très diverses ; ce mélange évolue sous l'influence des facteurs suivants :

eau	température	activité biologique
façons agricoles	processus chimiques	

#### 83.1 Texture

##### 831.1 Définition

La texture d'un sol indique comment ledit sol est composé. Pour cela, on utilise les deux critères infra

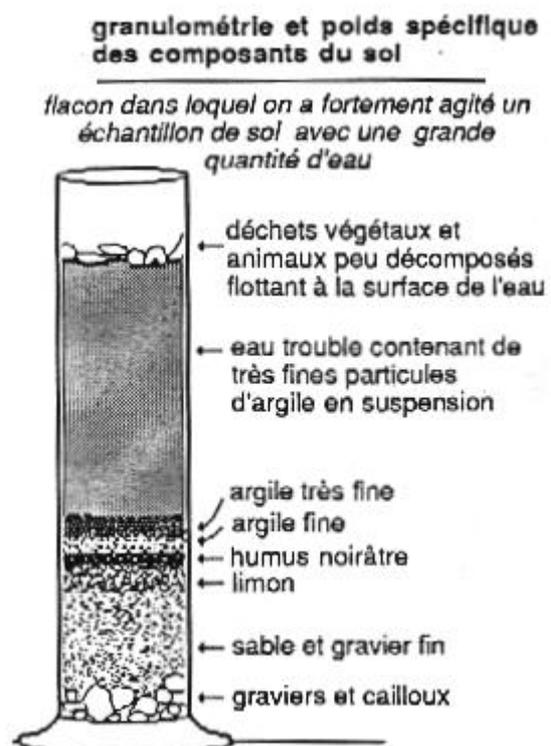
##### 831.2 Granulométrie

###### •Expérience

Si l'on prend une poignée de terre fertile et qu'on la place dans une éprouvette transparente, on obtient :

(voir figure infra )

- des éléments plus légers que l'eau
- des éléments en suspension
- des éléments plus lourds et fins



- des éléments plus lourds et épais

Le tri de ces éléments reste fonction : de leur poids spécifiques, de la finesse de leurs grains, de leur capacité de dissolution, de leur attirance pour l'eau

### 831. 3 Porosité

#### •Définition

$$\text{porosité} = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}}$$

#### •Application

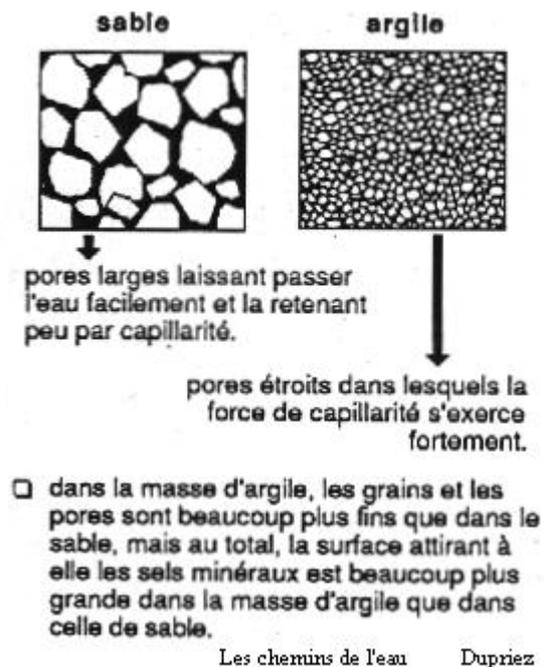
Si l'on considère la figure infra, et que l'on compare deux petits volumes semblables, l'un de sable, l'autre d'argile,

l'on remarque :

QUE l'espace laissé pour la circulation de l'eau diffère grandement, à tel point que la force de capillarité joue pleinement dans l'argile et peu dans le sable.

L'argile est classée comme imperméable,

le sable comme perméable.



### 83. 2 Structure

#### 832. 1 Définition

Il s'agit de la façon dont les matériaux mélangés sont organisés entre eux sous forme de : mottes, blocs, agrégats, grumeaux ....

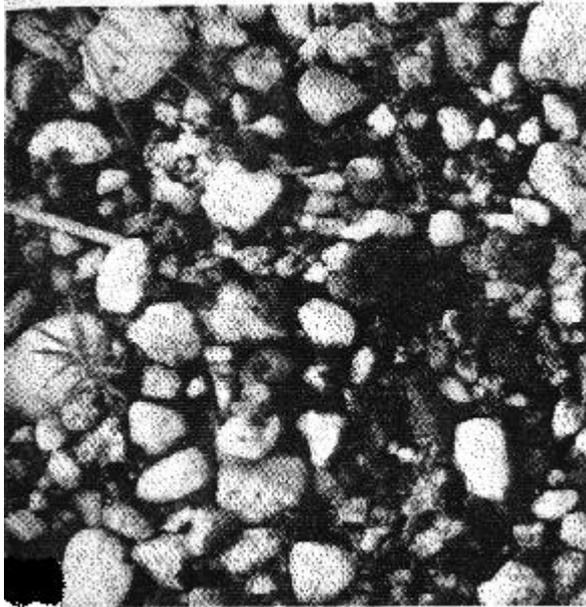
#### •Type et proportion des matériaux :

La structure présentera un aspect différent selon la prédominance de l'un ou de l'autre des matériaux.

#### •Façon dont le sol a été travaillé

Il peut être travaillé par l'eau, les organismes vivants et les outils aratoires.

#### 832. 2 Exemples



Les chemins de l'eau

Dupriez

La photographie ci-contre montre une structure où les limons et les graviers ne possèdent pas de lien entre eux. Cette structure conduit à un sol filtrant facilement lessivé.

La seconde photographie présente une structure compacte avec beaucoup d'argile. Si le sol est mouillé, il colle aux doigts, l'eau remplit les pores, l'air ne peut circuler, s'ils se dessèchent le sol devient dur ; on dit que la terre est "battante".



Les chemins de l'eau

Dupriez

## 84 Processus physico-chimique d'évolution

### 84. 1 Théorie

On relève trois processus distincts :

- décomposition et altération progressive des roches-mères
- augmentation et stabilisation de la matière organique
- déplacement des éléments solubles ou colloïdaux entraînant la constitution d'horizons appauvris (A) ou enrichis (B).

### 84. 2 Les horizons

### 842.1 Définition

Il s'agit d'une couche du sol nettement différenciée par sa couleur et ses propriétés.

### 842. 2 Horizon éluvial

Horizon superficiel plus ou moins appauvri par suite du lessivage qui amène des migrations d'éléments minéraux ou organiques. Ces horizons sont désignés par "A" (avec des sous catégories les A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, etc..)

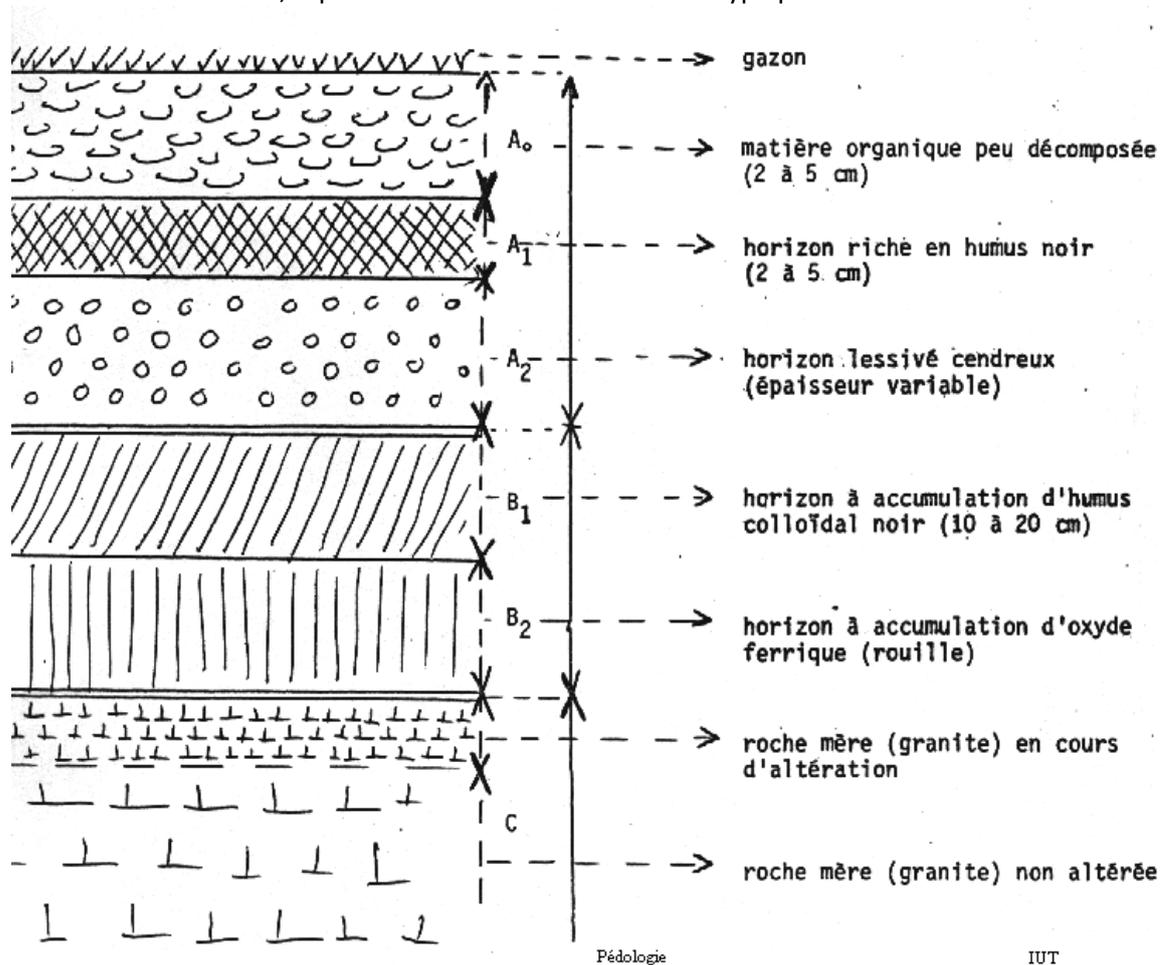
### 842. 3 Horizon illuvial

Horizon profond : zone enrichie où s'accumulent les éléments venant de "A". On les distingue par "B" (avec des sous catégories : les B<sub>0</sub>, les B<sub>1</sub>, les B<sub>2</sub>, etc..)

### 842. 4 Roche mère

Elle supporte les précédentes et elle est désignée par C.

Voir le schéma infra, représentant un sol très lessivé de type podzol<sup>75</sup>.



## 84. 3 La systématique pédologique<sup>76</sup>

### 843. 1Principe de la classification des sols

La pédologie, science récente, a fait l'objet de nombreux modèles de classification des sols., parmi eux nous retiendrons une systématique à base climatique et chimique

<sup>75</sup> du russe pod : avec et zola : la cendre

<sup>76</sup> το πεδίο = le champ - ο λόγος = le propos

L'on utilise parfois le mot de **profil pédologique** il correspond à un ensemble constitué par les différents horizons du sol en un endroit donné.

### 843. 2 Sols à lessivage complet

#### • Sols podzolisés

##### \* podzol total

L'horizon devient de couleur blanche et d'aspect cendré, la quantité de l'eau tombée reste supérieure à la quantité de l'eau évaporée

L'humus reste acide avec pH = 4,5

L'on trouve le ortstein, sorte de cuirasse (alios des Landes) où se concentre les minerais

cf. croquis ci-contre

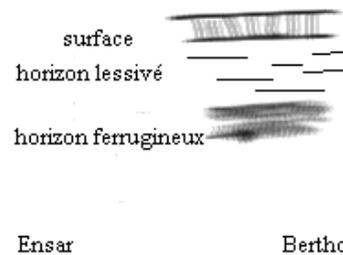
##### \* podzol ferrugineux

Quand le processus podzolique est moins poussé,

dans des régions à climat doux et humide

l'on constate une migration du fer,  
cf. croquis ci-contre.

cela suppose une roche mère très perméable, c'est le cas en France du plateau de Millevaches



#### • Sols bruns

Il s'agit de "terre à forêt". le pH atteint 7, pas de  $\text{CO}_3 \text{Ca}$  dans le profil, bon équilibre hydrique les mouvements *per ascensum* = mouvements *per descensum*. La forêt de Ploërmel en constitue un bon exemple.

#### • Sols latéritiques

Sous des climats tropicaux la décomposition de l'humus s'accélère l'on n'en trouve que des traces. Il se constitue une cuirasse composés de sesqui-oxydes de fer et d'aluminium (bauxite) hydratés appelé latérite. En Guinée elle atteint 30 mètres d'épaisseur elle demeure impropre à la culture sauf dans les fentes où poussent des graminées.

### 843. 3 Sols à lessivage partiel

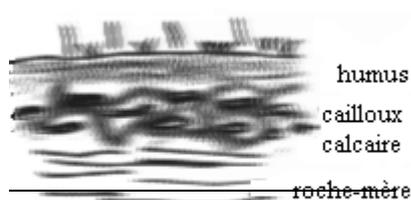
#### • Sols à tchernoziom<sup>77</sup>

Dans les zones semi-arides à climat continental comme la Roumanie et l'Ukraine l'on rencontre ces sols noirs dont les réserves en humus calciques restent considérables le taux varie de 6 à 16 %, ces sols stables s'avèrent très favorables aux cultures.

#### • Sols bruns semi-désertiques

L'on y constate un abaissement de la teneur en humus seulement 5 %, une décoloration le sol vire au brun, . On les rencontre en Asie centrale et au Soudan.

#### • Sols à rendzines



<sup>77</sup> mot russe signifiant terre noire

Ensar

Berthois

Sur des terrains calcaires, la couche de sol peut rester mince de l'ordre de 0,2 à 0,3 m, mais le pourcentage de matière organique restant élevé la couleur pourra devenir noire si peu de cailloux se trouvent en surface, par exemple dans les Causses.

Cf. croquis ci contre

Mais en Champagne du fait des cailloux la couleur deviendra blanche

#### 843. 4 Sols sans drainage

##### • en zone sub-arctique : toundra

Il tombe 200 mm/an , mais l'évaporation = 0 et l'eau sature les couches superficielles :

- couche de 0,50m gelant l'hiver, dégelant l'été,
- le tjäle de 0,60m à 2 m toujours gelé,
- la couche en dessous ne gèle pas

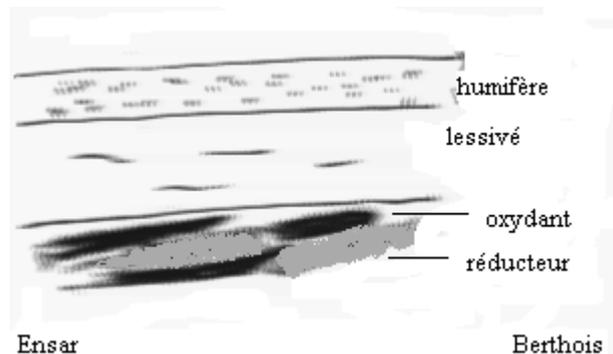
##### • en zone tempérée

#### \*sols podzoliques à horizon de Gley

Dans le fond des vallées où existe une oscillation importante de la nappe phréatique, l'horizon pédologique se trouve alternativement en zone réductrice ou oxydante ( le Fe se situant en zone réductrice)

d'où enchevêtrement de terrains de caractéristiques différentes

Ce phénomène fut observé par M Gley,



Cf . croquis ci-contre

#### \*sols marécageux

Les phénomènes chimiques et biologiques restent limités :

- en milieu acide, l'on rencontre les tourbières à sphaignes dites tourbières hautes (tourbe au-dessus de l'eau)
- en milieu alcalin ,l'on rencontre les tourbières alcalines, dites tourbières basses (tourbe sous l'eau)

#### \*sols avec présence de sels ou solontchak

Dans les zones basses des rivières de pays arides il se crée un mouvement ascensionnel avec dépôts de sels alcalins en surface, il se constitue alors une croûte constituée de sulfate et ce chlorure de sodium ou de sulfate et chlorure de magnésium

Il s'agit d'un sol impropre à toute culture , il se rencontre en pays Kirghize

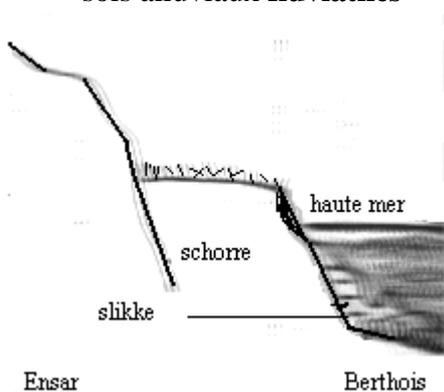
#### 843. 5 Sols peu évolués

Il s'agit de sols récents qui ont gardé l'aspect de la roche-mère originelle et des caractères liés au mode de dépôt, on les range en :

- sols alluviaux **continentaux**
- sols alluviaux **fluviaux**

##### • sols alluviaux **maritimes** : vases

On a pensé qu'elles provenaient d'une origine marine alors qu'elles étaient d'origine continentale Elles sont constituées d'éléments de dimension entre 200  $\mu$  et 0,5  $\mu$  à caractère quartzeux dominant



cf. schéma ci-contre

Lorsque le schorre est exondé Il se montre peu fertile, car il existe trop de sodium et magnésium

### N.B. Profil cultural

Il représente l'ensemble constitué par la succession des couches de terre individualisées par l'intervention des instruments aratoires, des racines, des végétaux, et des facteurs naturels réagissant à ces actions. Il s'agit donc de l'aspect de la partie du sol intéressé par l'agriculture.

## 85 Evolution de la matière organique du sol

### 85.1 Rappel et définition



**Ohne wald , kein wasser**

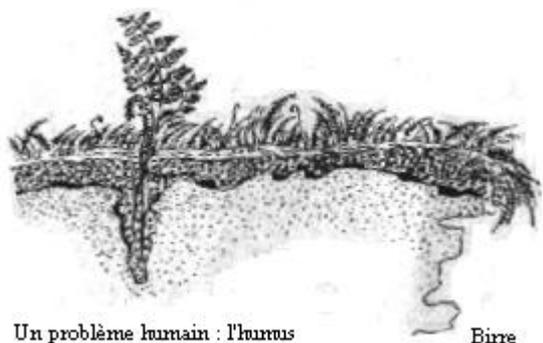
Sous-bois en forêt de pins

Deutschemweltendienst

Cette formule lapidaire utilisée par le service d'environnement allemand "*Sans forêt, pas d'eau*" résume bien la question.

Voir photographie supra

### 851.1 Le végétal conquérant de la planète



Un problème humain : l'humus

Etire

Dès qu'un sol se forme sur une roche, on voit apparaître une végétation en rapport avec l'épaisseur et la richesse du sol constitué

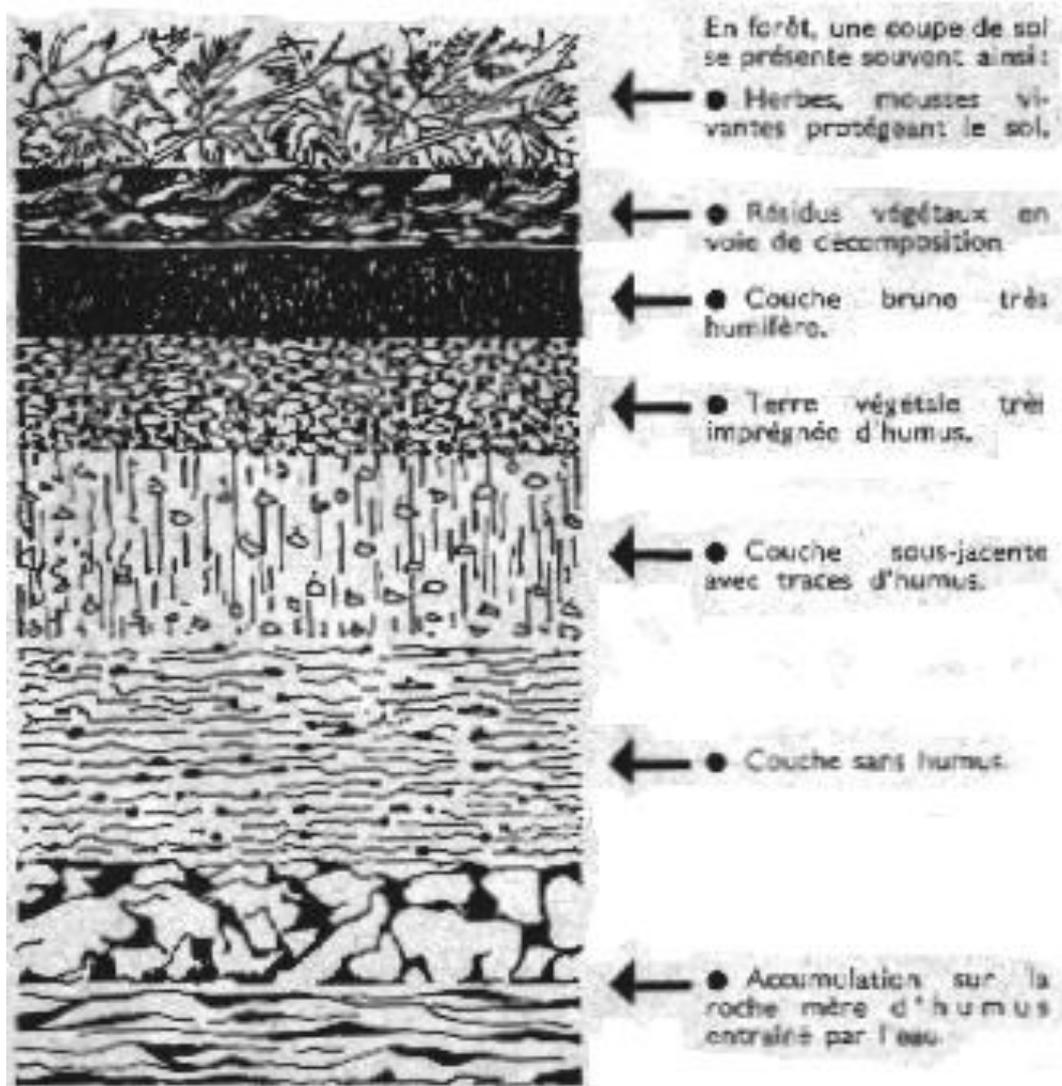
Sur le dessin ci-contre l'on reconnaît des fougères et des mousses. La coupe du sol révèle des débris végétaux en dessus, de petites formations d'humus dans les creux, de petits grains de poussière et de roches apportés par le vent.

Chacune de ses parties est habitée par des groupes d'animaux et de microbes qui se nourrissent de ces débris situés dans une couche qui peut ne présenter que quelques millimètres d'épaisseur.

### 851 . 2 Définitions de l'humus<sup>78</sup>

Quand un végétal s'installe, il constitue sous lui, l'humus qui sert à la croissance.

Dans la coupe infra, nous voyons l'humus se répartir en couche selon les horizons du sol ; sa présence permet de connaître la vitalité du sol.



Un problème humain : l'humus

Rime

<sup>78</sup> du latin humus, i : le sol

Ainsi la vie repose-t-elle dans les quelques centimètres superficiels au sein desquels se constitue l'humus où ce dernier exerce son action vivifiante.

L'augmentation de la couche d'humus s'effectue lentement : 1 cm par siècle.

## 85. 2 Genèse de l'humus

Elle revêt l'aspect d'un drame en deux actes.

### 852. 1 Démolition

Les matières végétales mortes sont attaquées par des équipes spécialisées et successives de microbes et de diastases, leurs molécules se fractionnent pour donner des molécules plus petites.

### 852. 2 Reconstitution

Quand tout a été démolì, il convient de reconstruire avec les débris de ce que l'on a cassé en y ajoutant des éléments d'autres provenances.

Il existe deux séquences dans cette action de reconstitution, l'une due aux organismes vivants, l'autre résultant d'une action purement chimique.

### 852. 3 Résultat

A la fin, une nouvelle matière se constitue : l'humus.

Monsieur Barbier résumait le processus ainsi : "*De grosses molécules de végétaux morts sont décomposées en molécules plus petites qui peuvent se regrouper pour former les grosses molécules sphériques d'acides humiques.*"

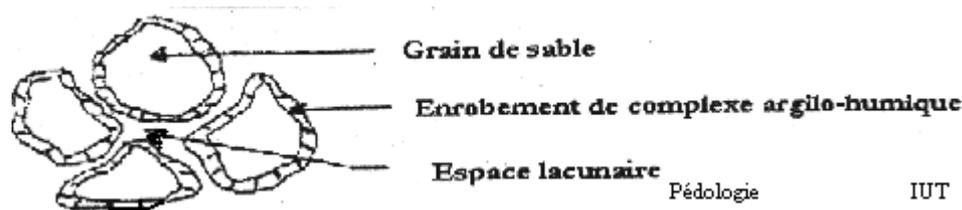
Le coefficient C/N du produit obtenu indique le degré d'humification C/N = 168 pour la paille contre 25 pour le fumier.

## 85. 3 Humus et circulation de l'eau

L'humus confère au sol une structure vivante.

### 853. 1 Augmentation de la capacité de stockage de l'eau

Les grains de sol (dans un terrain de bonne structure) sont entourés d'une pâte baptisée "complexe argilo-humique". Entre eux existent des vides remplis d'air ou d'eau.



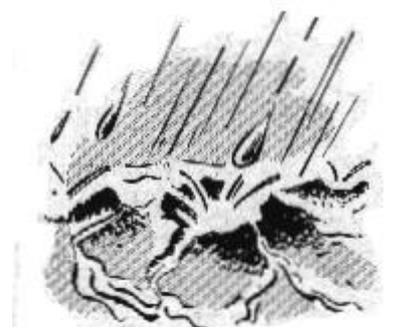
Les terres lourdes peuvent respirer et garder l'eau.

Les terres légères deviennent moins filtrantes et gardent l'eau. Tout ceci constitue un premier obstacle à l'inondation comme au dessèchement.

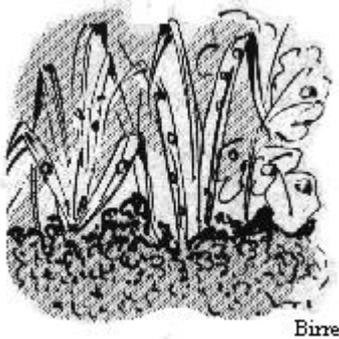
### 854. 2 Accroissement de la résistance au choc de la pluie.

Lorsque la goutte d'eau tombe sur le sol, elle agit comme une petite bombe

Cf. dessin ci-contre



La mousse, l'herbe puis l'humus complètent l'action du ralentissement de la goutte et jouent le rôle d'éponge.



Cf . dessin ci-contre

Cette capacité d'éponge se trouvera d'autant plus forte que le degré d'humidification sera plus élevé, ainsi la tourbe retiendra QUATRE fois plus d'eau que la paille.

## 9 Modèle, Initiation à l'usage de logiciel

### En liminaire :

Les modèles réduits fondés sur le principe de la similitude dynamique de Froude, fort utilisés en hydraulique comme en aéronautique sont traités dans un autre chapitre. Il s'agira dans les présentes lignes des modèles représentés par des logiciels.

### 91 Théorie du modèle hydraulique

#### 91.1 Introduction

Dans le dessein de simuler sur logiciels des écoulements en rivière, deux grandes classes de modèles sont usitées :

- les modèles mécanistes à partir des équations fondamentales des fluides,
- les modèles macroscopiques conçus à partir d'une vision plus globale des phénomènes

#### 91.2 Formulation mathématique des phénomènes physiques

Si l'on emploie le modèle mécaniste pour décrire un écoulement, trois lois peuvent être formulées :

- l'équation de continuité ( de Lavoisier) OU de conservation de la masse :

$$\frac{dQ}{dx} + \frac{d\omega}{dt} = 0$$

- le théorème de la quantité de mouvement (d'Euler): →

$$mU_1 + m U_2 = \Sigma \text{ forces (poids, frottement, paroi) ou } d(\underline{mU}) = \Sigma F$$

- le théorème de l'énergie cinétique (de Bernoulli) :

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2} + \xi_x = C^{te} \text{ ou } d(\frac{1}{2} m U^2) = T \text{ forces appliquées} + T_{\text{pesanteur}}$$

#### 91.3 Hypothèses de Saint Venant

En 1871 , Saint Venant a formulé des hypothèses simplificatrices des phénomènes qui permirent la modélisation tant sur modèles réduits que sur logiciels , à savoir :

Vitesse uniforme, écoulement unidimensionnel, courbure des lignes de courant faible, pente du lit faible, érosion des berges négligeable, frottement selon les lois du régime permanent.....

## 92 Exemple de logiciel : canal 9

### 92.1 Principe

Ce logiciel qui s'intègre dans le système DOS fut conçu par le Cemagref rhônalpin, outre ses qualités *sui generis* il donne d'intéressantes informations – pour les canaux – sur le débit, le tirant d'eau, la courbe de remous, les ressauts....

En supposant que le régime est permanent que la géométrie du canal est rectangulaire, on peut effectuer TROIS types de simulation :

### 92.2 Simulations sur la section

Pour une section choisie l'on peut faire varier la hauteur d'eau ou le débit en fixant la pente et la coefficient de rugosité.

L'on obtiendra le tirant d'eau critique ( passage du torrentiel au fluvial par un ressaut) et le tirant d'eau normal

La courbe infra donnera l'énergie  $E$  ou charge en fonction de la hauteur d'eau  $h$  (tirant d'eau). Cette énergie reste minimum pour la hauteur critique et à ce moment  $u = \sqrt{gh}$ ,  $F = 1$  en effet

la formule de Bernoulli  $E = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}$  devient  $E = h + \frac{u^2}{2g}$  (1)

mais  $u = q / \omega$  et  $\omega = h \cdot 1$  (section en canal rectangulaire par unité de largeur du canal)  
donc  $E = h + \frac{q^2}{2g h^2}$  (2)

au point critique, minimum de la courbe  $E = f(h)$ , tangente = 0 et  $\frac{dE}{dh} = 0$

dérivons (2):  $\frac{dE}{dh} = 1 - \frac{q^2}{g h^3} = 0$  (3) donc  $h^3_{critique} = \frac{q^2}{g}$  f(de la section)

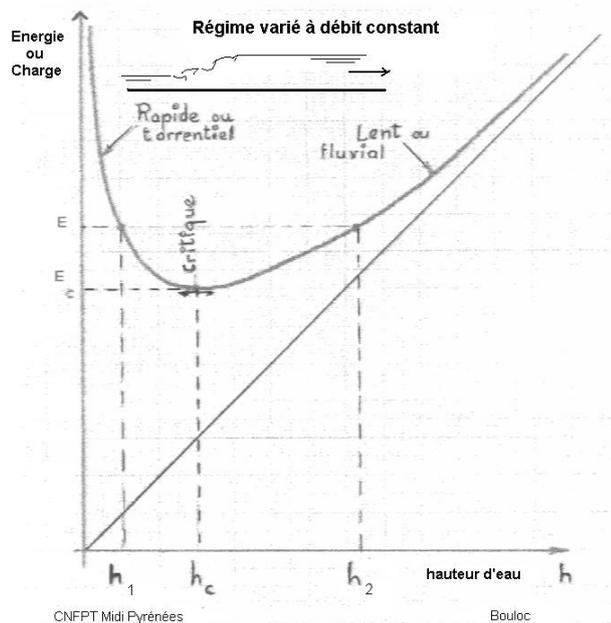
L'équation (2) devient :

$$E_c = h_c + \frac{q^2}{2g h_c^2}$$

il vient

$$E_c = h_c + \frac{g h_c^3}{2g h_c^2}$$

$$E_c = \frac{3}{2} h_c$$



**N.B.** la vitesse absolue de l'onde remontante ( remous) =

vitesse du flot ( $u$ ) – célérité de l'onde ( $\sqrt{gh}$ )

Comme  $q = u h$  donc  $q^2 = u^2 h^2$  mais  $q^2 = g h^3$  (selon (3))

donc  $u = \sqrt{gh}$ , la vitesse du remous = 0, donc il n'y a PAS d'influence de l'aval sur l'amont si  $h < h_c$

### 92.3 Simulations sur les dimensions de l'ouvrage

Le logiciel permet d'effectuer des simulations sur un déversoir en déterminant les variations de tirant d'eau amont et aval

### 92.4 Simulations sur la courbe de remous

Il s'agit de définir l'exhaussement de l'eau en amont suite à un barrage par exemple. Le canal sera donc découpé en biefs successifs dont on connaît la longueur, la pente, le coefficient de rugosité.

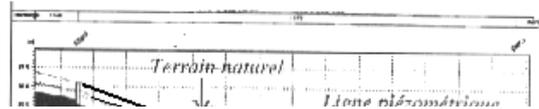
Le logiciel travaillera d'aval vers amont en régime fluvial mais d'amont vers l'aval pour les régimes torrentiels et il trouvera les emplacements des ressauts hydrauliques.

De plus il déterminera à partir des profils en travers si les berges sont devenues submersibles ou pas.

### 93 Autre exemple : logiciel Mouse

Fabriqué au Danemark à Hershholm, il permet  
En **hydraulique**  
de connaître l'écoulement dans un cours d'eau

le tirant d'eau MAX (ligne piézo) déborde sur la berge



Cf. graphique ci-contre

En **hydrologie**  
de connaître les pluies critiques tombées sur le

En **potamologie**  
de connaître le débit de pointe par l'hydrogramme  
d'écoulement.

**B**ien des fois, la nature nous a rappelés à l'ordre et nous a prodigué des enseignements auxquels nous n'avons pas prêté l'oreille :

tempêtes de poussière, inondations, sécheresse....  
qui exigent une action immédiate si nous voulons  
sauver le pays pour nos descendants....

**Epi** nous faut regarder loin dans l'avenir. La nature nous annonce nettement qu'elle n'entend plus supporter les abus commis par la main de l'homme.....

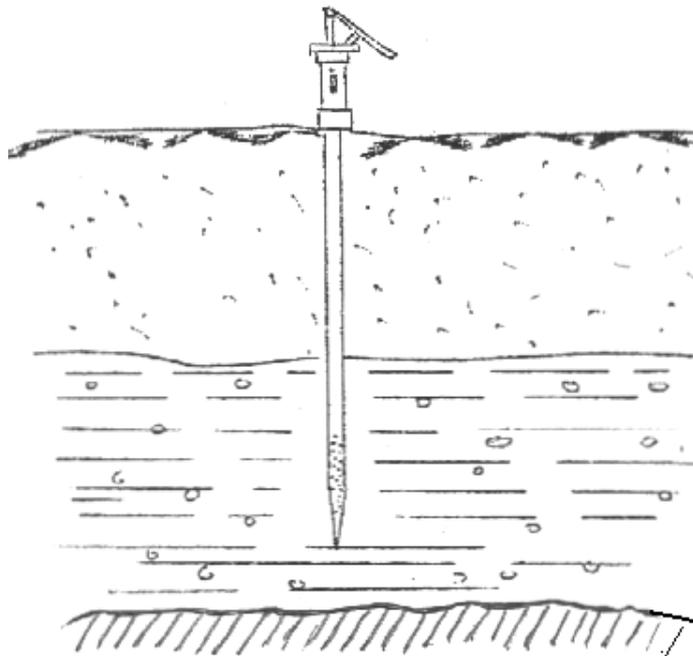
Franklin Delano **Roosevelt**

le 3 juin **1937** au congrès américain de Washington



## Hydrogéologie et éco-systèmes

---



**Circulation souterraine**  
**Lien eau souterraine /eau superficielle**

# Circulation dans l'unité d'intervention

## Action anthropique sur les flux

### Ecosystèmes aquatiques

### Pollution

### Prévention

## Prologue

Δια του στοιχειώδους υγρού  
διατήκει η θεία κινητική δύναμή <sup>79</sup>

Θαλής

Au VIIème siècle avant Jésus-Christ, le mathématicien philosophe Thalès exprimait déjà son point de vue sur l'eau dans l'épigramme en exergue où il lui reconnaissait un mouvement induit par les dieux.

Il ne paraît donc pas illogique qu'au cours de l'histoire ce furent les **philosophes** qui se préoccupèrent des **eaux souterraines** et de leur origine, pas toujours avec bonheur d'ailleurs, si l'on en croit les deux exemples suivants :

En 1684, Charles Perrault écrivait : " ... je crois que la pluie ne pénètre point la terre et ne descend point .... " il rédigea aussi des contes pour enfants

A la même époque, Descartes <sup>80</sup> donnait l'explication suivante : " ... sous les montagnes, il y a de grandes concavités remplies d'eau, que la chaleur élève continuellement en vapeur. Ces vapeurs se glissent par tous les pores de la terre et produisent des fontaines... "

Pourtant dès 1580, **Bernard Palissy**<sup>81</sup> dans son livre : " Discours admirables de la nature des eaux et des fontaines " affirmait que les sources provenaient bien des eaux d'infiltration des pluies.

---

<sup>79</sup> Le fluide élémentaire ( *l'eau* ) est traversé par une force motrice qui vient des dieux

<sup>80</sup> célèbre philosophe auteur du *cogito, ergo sum* : je pense donc je suis

<sup>81</sup> inventeur de l'émail polychrome, la légende assure qu'il dut brûler ses meubles pour réaliser ses expériences

Vers 1700, l'abbé Mariotte dans son : " Traité du mouvement des eaux " reprit cette idée qui s'imposa dès lors. ; il établit également la loi sur les gaz  $PV = \text{constante}$

Au cours de cette seconde **partie du cours**, consacrée surtout à l'hydrogéologie, il sera traité des sujets cités infra

### **1 Hydrogéologie ou circulation souterraine de l'eau**

- Circulation souterraine dans un bassin-versant

- Lien eau souterraine/ eau superficielle

- Circulation dans l'unité d'intervention ou parcelle

### **2 Action anthropique sur les flux**

### **3 Eco-systèmes aquatiques**

- Pollution et prévention

## **Circulation souterraine de l'eau dans un bassin-versant**

### **1 Infiltration**

11 Mouvement de l'eau dans le sol

12 Infiltration efficace et nappe souterraine

### **2 Lois fondamentales d'écoulement d'un fluide homogène en milieu**

**poreux**

21 Loi expérimentale de Darcy

22 Loi de Darcy

### **3 Horizon aquifère**

31 Définition

32 Nappe

33 Mesure de la hauteur de la nappe phréatique

### **4 Types de circulation de l'eau souterraine**

41 Région à roches cristallines

42 Région à roches sédimentaires

### **5 Etude du fonctionnement d'un horizon aquifère**

51 Alimentation

52 Exutoire

53 Etude piézométrique

54 Modes de circulation de l'eau

## 6 Evaluations de la réserve et de la ressource

61 Généralités

62 Programme d'exploitation des ressources

# 1 Infiltration

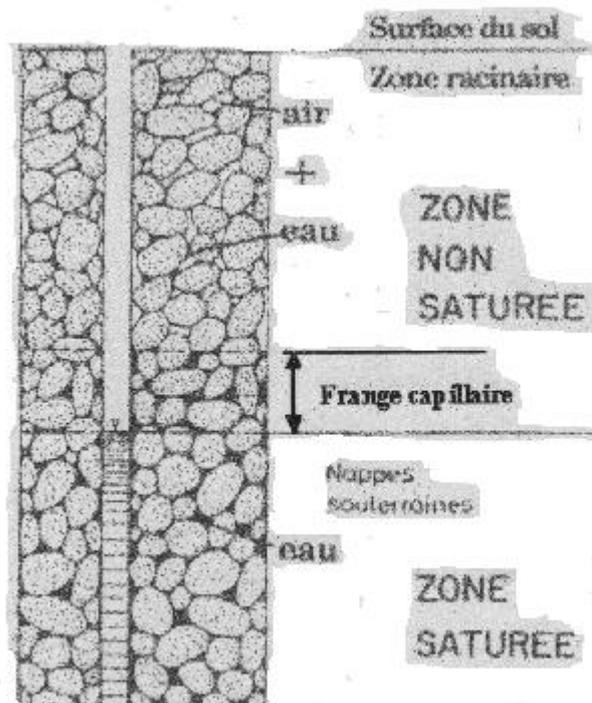
## 11 Mouvement de l'eau dans le sol

Dans la coupe de terrain infra on remarque que l'eau dans un volume de sol, est soumise à des forces contradictoires qui la mettent en mouvement :

- infiltration qui peut être verticale ou latérale, mais qui suit toujours un mouvement descendant.
- remontée capillaire et absorption racinaire, si tant est que racines il y ait.

Cela aboutit à identifier deux zones

- la zone " non saturée ", où seule une partie des espaces lacunaires est remplie d'eau, le reste étant occupé par l'air du sol ( système à 3 phases liquide, solide, gazeuse)



Distinction entre une zone non saturée et une zone saturée

- la zone " saturée " où tous les pores sont remplis d'eau ( système à 2 phases liquide , solide)

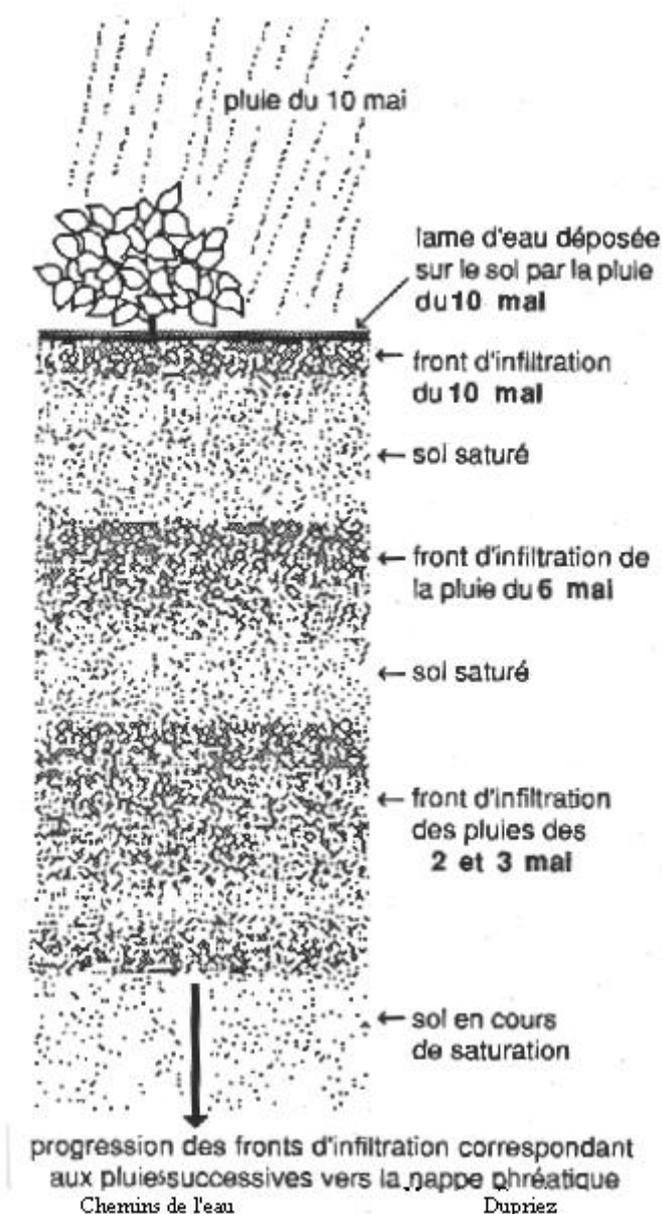
## 12 Infiltration efficace et nappe souterraine

Si le sol présente un caractère suffisant de perméabilité : l'eau de pluie s'infiltr

Si l'on désigne par " front d'infiltration " la limite inférieure de la couche d'eau s'infiltrant dans le sol, la saturation des couches successives s'effectue par gravité, l'eau s'écoulant par son propre poids entre les grains de sol et par capillarité.

Quand un sol est saturé dans sa capacité au champ ( cf. le cas de l'éponge saturée, l'eau libre étant écoulée) les lames d'eau ne font que traverser les couches de sol saturé.

Cette eau va se diriger vers la nappe phréatique (nappe des puits). Plus la nappe phréatique est profonde et plus le temps nécessaire aux lames d'infiltration pour l'atteindre s'allongera.



Ceci explique que la remontée de l'eau dans un puits n'interviendra que plusieurs jours, ou plusieurs semaines après les pluies, car

il faut, à l'eau, le temps :

- de saturer les couches desséchées
- de parcourir ensuite la distance séparant la surface du sol du niveau de la nappe.

**N. B.** L'abaissement du niveau de la nappe sera d'autant plus rapide

que s'installe le ruissellement à la surface des terres

au détriment de l'infiltration.

## 2 Lois fondamentales d'écoulement d'un fluide homogène en milieu poreux

Les milieux poreux nous intéressent seulement dans la mesure où il est possible d'exploiter les réserves de fluide qu'ils contiennent.

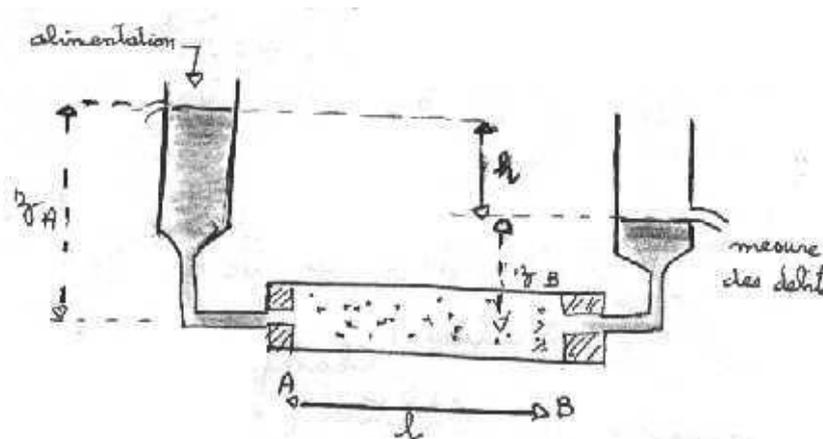
Ils doivent donc jouer non seulement le rôle de **réservoir** de stockage, mais encore celui de **conducteur**.

Le caractère conducteur du milieu poreux sera apprécié par la loi expérimentale de Darcy, alors que la loi de continuité permettra de définir la capacité de réservoir dudit milieu.

### 21 Loi expérimentale de Darcy (ou de conservation du moment)

*" J'aborde maintenant le récit des expériences que j'ai faites à Dijon avec l'ingénieur Rillier pour déterminer les lois de l'écoulement de l'eau à travers les sables.... "*

Darcy



En 1854, Darcy alors en charge de l'eau potable à la ville de Dijon voulut perfectionner la filtration des eaux de rivière souvent troubles. Ainsi qu'il l'indique dans son rapport cité en exergue, il réalisa l'expérience représentée par le croquis supra.

Il en résulta la loi expérimentale qui régit l'écoulement d'un fluide incompressible en terrain poreux et conduit à la définition d'une grandeur caractéristique du milieu (par rapport au phénomène d'infiltration) : il s'agit de le **perméabilité K du terrain considéré**.

Elle peut donc s'écrire ainsi :

$$V = \frac{Q}{S_T} = K \frac{h}{l}$$

V = vitesse fictive moyenne d'infiltration

Q = débit d'infiltration

$S_T$  = section totale d'écoulement = "vides + pleins"

$h =$  charge hydraulique ( $\frac{p}{\rho g} + z$ ) le terme  $\frac{v^2}{2g}$  étant négligeable en infiltration

$\rho g$                        $2g$

$p =$  pression en un point considéré,  $z$  : cote du point considéré

$l =$  longueur du cylindre comptée positivement dans le sens du courant

$\frac{h}{l} =$  pente motrice, ou pente de la ligne de charge, ou perte de charge linéaire ou gradient hydraulique

$l$

On peut écrire aussi en notation tensorielle sous la forme

→→

$$V = -K \text{ grad } h$$

K = tenseur de perméabilité

$h =$  potentiel hydraulique

→

la charge baissant dans le sens de l'écoulement, pour que V, champ de vitesse de filtration, reste positif, il faut introduire le signe moins. D'une façon générale, pour une fonction U (x, y, z) on appelle gradient de la fonction U :

→

$$V = \text{grad } U = \left[ \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z} \right]$$

### 21.1 Calcul de K, coefficient de perméabilité

L'unité de coefficient de perméabilité qu'on peut appeler aussi conductivité hydraulique, n'a pas reçu de nom particulier. Ce coefficient reste fonction à la fois du fluide et des caractéristiques du milieu perméable.

La valeur du coefficient **dépend de la granulométrie** des sols traversés. Allen Hazen a donné la formule :

$$K = 100 [d_{10}]^2 \quad (K \text{ en cm/s})$$

$d_{10}$  : dimension du grain en cm, telle qu'il n'y ait que 10 % en poids de grains de dimensions inférieures.

granulométrie	K
sables grossiers	$10^{-3} \ll 10 \text{ cm/s}$
sables fins	$10^{-4} \ll 10^{-3} \text{ cm/s}$
limon	$10^{-8} \ll 10^{-4} \text{ cm/s}$
argile	$10^{-10} \ll 10^{-6} \text{ cm/s}$

L'allemand Thiem a proposé un module

$$K = \frac{\eta}{\alpha} \quad \eta = \frac{\text{volume vides}}{\text{volume total}}$$

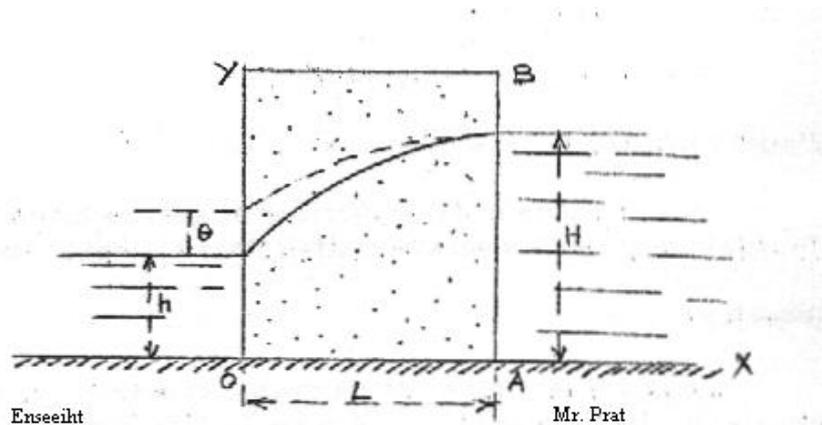
$\alpha = 1266$  pour sables grossiers

$\alpha = 5760$  pour sables fins

### 21.2 Application au calcul de débit des nappes

Soit une couche aquifère reposant sur un plan imperméable O X

Considérons une tranche de ce massif limité par deux plans verticaux OY et AB distants de L. Ouvrons une tranchée à gauche de OY ; l'eau s'écoulera de la face AMONT AB sur laquelle elle atteindra une hauteur H vers la face AVAL OY sur laquelle cette hauteur sera ramenée à h.cf. figure *infra*



En prenant les hypothèses simplificatrices de Dupuit :

- le niveau de l'eau suit une ligne continue entre les deux niveaux amont et aval
- en un point de la surface l'angle  $\vartheta$  que fait le niveau d'eau avec l'horizontale reste faible donc  $dy = dx$

- l'écoulement s'effectue en tranche, ie, pour les points situés sur une même verticale, les vitesses demeurent égales entre elles et horizontales.

Pour une épaisseur d'un mètre de massif filtrant le débit devient :

$$Q = \frac{K}{L} (H + h) (H - h)$$

La valeur de Q est donc :

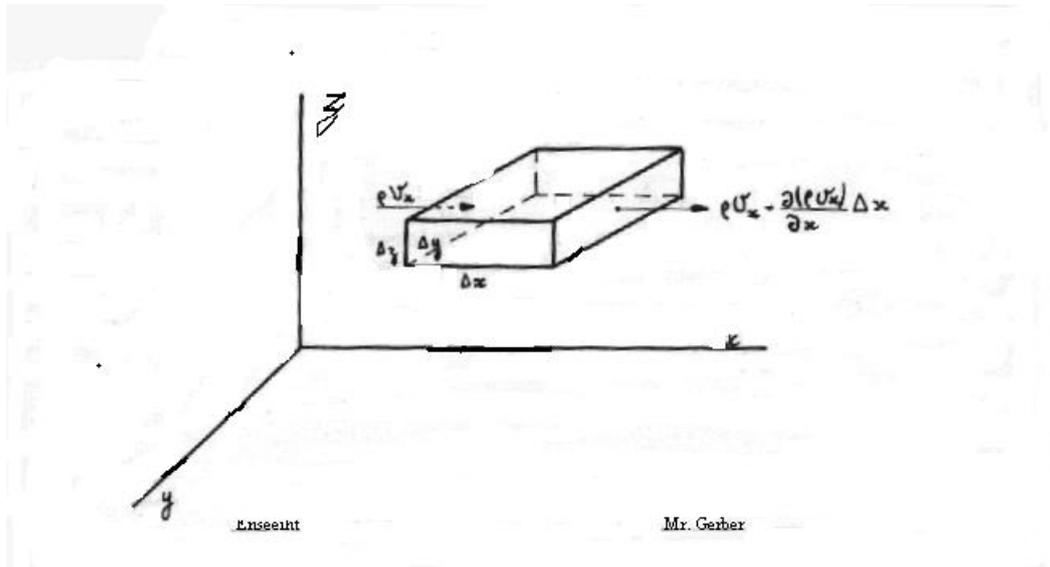
**directement proportionnelle** à la dénivellation (rabattement)  $H - h$  et à la hauteur moyenne de l'eau dans le massif

**inversement proportionnelle** à la largeur du massif.

## 22 Loi de Lavoisier (ou de conservation de la masse)

" La masse totale des corps évoluant dans un système fermé reste constante."

Le principe d'indestructibilité de la matière traduit par la formule "Rien ne se perd, rien ne se crée mais tout se transforme " conduit à la loi de Lavoisier citée en exergue, dite aussi Loi de conservation de la masse.



Pour l'écoulement d'un fluide, cette loi exprime que, sur un volume élémentaire et sur un intervalle de temps, **l'accroissement de masse de ce volume** est égale à la différence entre la masse du fluide qui entre et celle qui sort dudit volume.

Sur la figure supra, la masse contenue dans le volume élémentaire s'écrit

$$M = \rho \tau \Delta x \Delta y \Delta z \quad \tau = \text{teneur en eau} \quad \rho = \text{densité}$$

Mais le milieu est compressible ; donc la densité, la porosité et la dimension verticale, varient dans le temps ; les variations  $\Delta y$  et  $\Delta x$  sont négligeables devant  $z$ , si  $\rho = 1$

$$\frac{\Delta \tau}{\Delta t} = - \frac{\Delta M}{\Delta z}$$

$\Delta \tau$  : variation de la teneur en eau

(+ ou - si le sol perd ou stocke de l'eau)

$\Delta M$  : variation flux transitant

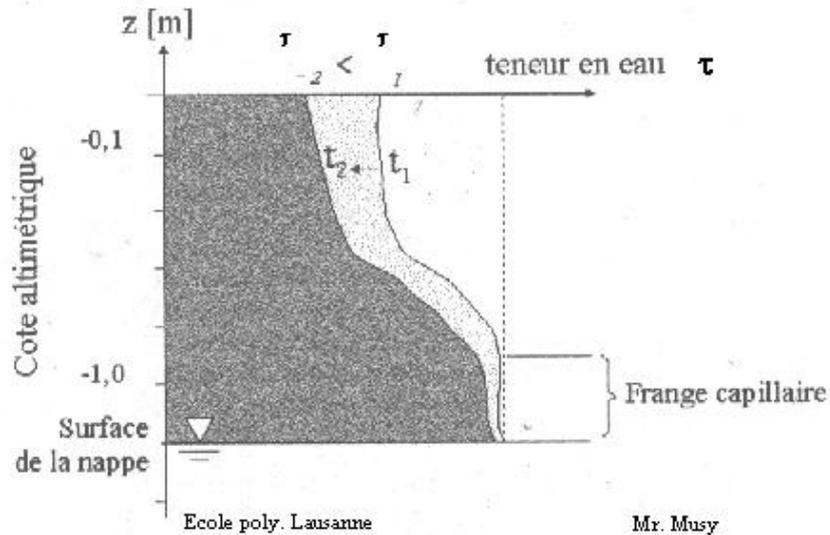
$\Delta z$  : variation de la profondeur

$\Delta t$  : variation du temps

### 22.1 Notion de profil hydrique ou de courbe isochrone d'humidité

La variabilité spatiale et temporelle de la teneur en eau dans le sol est décrite par les profils hydriques successifs représentant la distribution verticale des teneurs en eau du sol à différents instants.

La surface comprise entre deux profils ou entre deux courbes isochrones d'humidité, successifs aux temps  $t_1$  et  $t_2$  représente la masse d'eau parunité de surface stockée ou perdue dans



l'intervalle de temps.

### 22.2 Application à l'appréciation du stock de fluide

Soient 2 profils hydriques aux temps  $t_1$  et  $t_2$ , entre les cotes altimétriques  $z_1$  et  $z_2$

$$\Delta M = M_1 - M_2 \quad M_1, M_2 : \text{flux d'eau entre } t_1 \text{ et } t_2 \text{ à travers les cotes } z_1 \text{ et } z_2$$

$$= - \int_{z_1}^{z_2} \Delta \tau dz$$

$\Delta t$   $z_1$

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = - \int_{z_2}^{z_1} (\Delta S) dz \quad \Delta S : \text{surface comprise entre les deux profils hydriques et les deux profondeurs}$$

## 3 Horizon aquifère

### 31 Définition :

Un horizon aquifère<sup>82</sup> est une formation géologique perméable (sol ou roche) dont les pores ou fissures communiquent et sont suffisamment larges pour que l'eau puisse y circuler librement sous l'effet de la gravité (ex. : sables, graviers, craie fissurée, grès). L'horizon aquifère constitue un réservoir des nappes d'eau souterraines.

### 32 Nappe

#### 32.1 Définition :

Le terme "nappe" fut utilisé la première fois, par le physicien Coulomb, en 1770, dans son ouvrage "Essai sur une application des règles de maximum et de minimum à quelques problèmes statiques".

On appelle "nappes" en hydrologie, l'ensemble des eaux souterraines qui occupent un milieu à l'intérieur duquel elles se trouvent en intercommunication.

#### 32.2 Caractéristiques générales

<sup>82</sup> Aqua, -ae : eau et ferre : porter

Une nappe est formée par l'eau qui imprègne une partie de terrain perméable reposant sur une couche imperméable.

Le plus souvent, cette eau se déplace verticalement et horizontalement ; le second mouvement s'avérant plus important que le premier. Il s'effectue à une vitesse habituellement inférieure à 5 cm/heure et dépassant rarement 25 cm/heure.

La surface **piézométrique**<sup>83</sup> (surface de la nappe) est la surface de la zone saturée d'un horizon aquifère à surface libre ou correspond au toit d'un horizon aquifère à nappe captive. La mesure de son niveau s'effectue par un piézomètre (tube). La surface libre d'une nappe correspond au lieu des points où la pression de l'eau est égale à la pression atmosphérique laquelle est égale à la surface piézométrique, si effet capillaire = zéro.

### 32.3 Classification

#### 323.1 Nappe libre

##### • Définition :

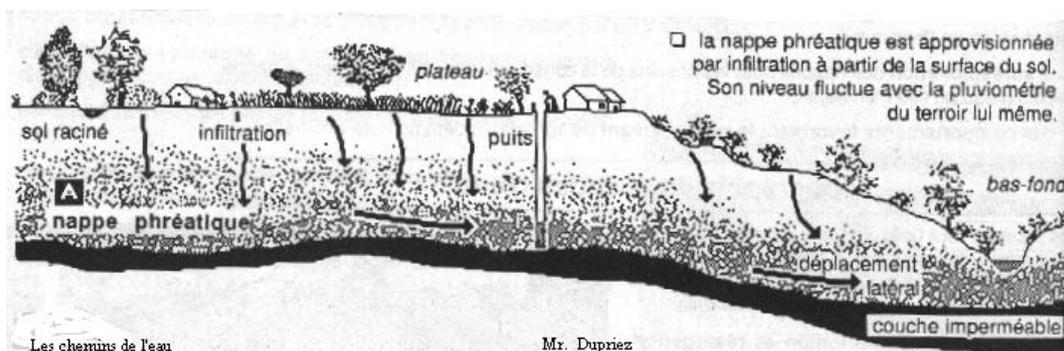
Une nappe est libre si elle repose simplement sur une couche imperméable et que l'écoulement de l'eau s'y effectue sans pression, cf. croquis infra, de A à B la nappe est surmontée par une zone non saturée donc contenant de l'air à la pression atmosphérique.

$$\text{Energie} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad \text{car } p = 0 \quad \text{et } \frac{v^2}{2g} = 0 \quad \text{car } v \text{ est très faible (Bernoulli)}$$

##### • Nappe phréatique<sup>84</sup>

La première nappe libre ou captive qu'on rencontre à partir du sol, est appelée phréatique ainsi que l'a définie Daubrée dans son ouvrage "Eaux souterraines à l'époque actuelle". En Allemagne, on emploie le nom de *Grundwasserspiegel* ; les Italiens disent : *acqua di livello*,,,,,, les Hollandais emploient le mot *welwater*, en Angleterre on utilise *waterlevel*.

cf. schéma infra



#### 323. 2 Nappe captive

##### • Définition

Une nappe est captive ou fermée, lorsque l'eau est maintenue entre deux couches imperméables et la charge hydraulique de l'eau qu'elle contient, peut être supérieure à la cote du toit de la nappe ; voir croquis infra, nappe 2. Energie =  $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$  car vitesse voisine de 0 (Bernoulli)

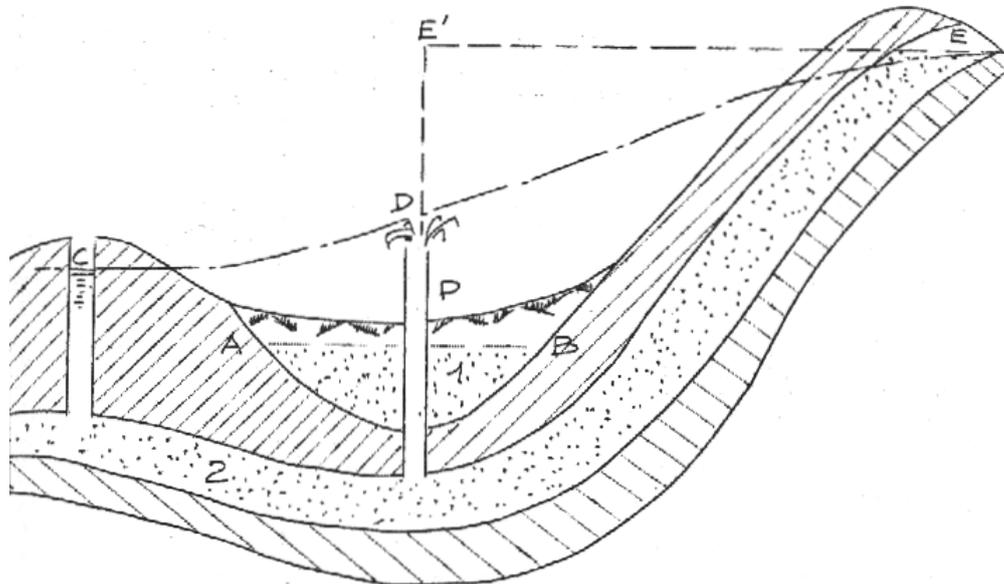
$$\frac{p}{\rho g}$$

<sup>83</sup> Πιέζω : presser ; τόμετρο : la mesure

<sup>84</sup> το φρέαρ, ατος : le puits

•Nappe artésienne<sup>85</sup>

Si la forme des deux couches imperméables dans le sol met l'eau en pression, l'écoulement se met en régime forcé et la nappe devient artésienne. Elle sera ascendante si elle s'élève dans un puits, et jaillissante si elle monte au-dessus du sol.



1. Nappe libre phréatique  
 2. Nappe captive : jaillissante en D  
 ascendante en C

AB : niveau piézométrique de la nappe libre  
 CDE : niveau piézométrique de la nappe captive  
 P : puits artésien  
 DE' : perte de charge dans le parcours souterrain

Enseeiht

Prat

$$E = z + \frac{p}{\rho g} \quad \text{car } \frac{v^2}{2g} = 0 \quad \text{puisque } v \text{ reste très faible} \quad (\text{Bernoulli})$$

L'exploitation de ces nappes essaïma depuis les Flandres pour être développée à Paris, puits artésien de **Grenelles (548 m)** puits de la **Chapelle (918 m)**.

En Algérie, près de Constantine, dans la vallée de l'oued Rhir, à partir de puits artésiens à 90 m de profondeur, on a recueilli par jaillissement des crabes et des petits poissons !

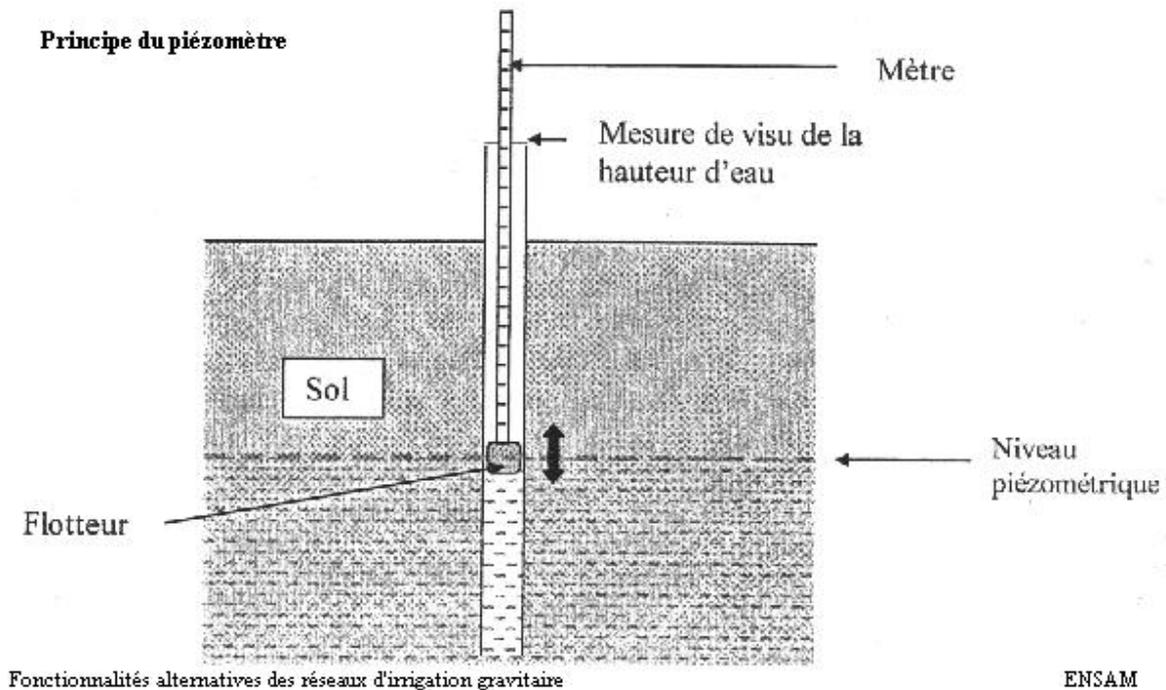
N.B.: Une nappe **semi-captive** possède un toit et un substratum semi-perméable, d'où possibilité d'échange d'eau avec des formations voisines (drainance).

33 Mesure de la hauteur de la nappe phréatique

Elle s'effectue au moyen d'un appareil appelé piézomètre constitué d'un flotteur et d'un câble qui permettent de connaître *de visu* la profondeur de la nappe.

cf croquis infra

<sup>85</sup> Car elles sont connues en Artois depuis 1126, date inscrite sur la margelle du puits artésien du couvent des Chartreux à Lillers.



## 4 Types de circulation de l'eau souterraine

### 41 Région à roches cristallines (éruptives, magmatiques)

#### 41.1 Porosité du granit et des roches éruptives profondes

Dans un granit frais, ou gabbro, la porosité<sup>86</sup> ( $V_v / V_t$ ) s'avère très faible....1% et, partant l'eau ne circule PAS dans de telles formations.

Si le granit s'altère, par le phénomène d'arénisation, des **fissurations** se produisent, la porosité augmente et peut aller à .... 30% permettant une certaine circulation **rapide** du fluide

#### 41.2 Porosité des roches éruptives d'épanchement

Dans les porphyres, les basaltes, il existe une "porosité de fissure" qui atteint en moyenne ... 13% permettant une circulation **rapide** de l'eau.

Cela entraîne dans le massif armoricain par exemple, des teneurs en fer dissous au-dessus des normes de potabilité (0,2 mg/l) ce qui oblige à un traitement de déferrisation.

<sup>86</sup> Rapport du volume des interstices, dans un matériau tel qu'un sol, au volume total vides compris OMM 1992

## 42 Région à roches sédimentaires

### 42.1 Généralités

Les roches sédimentaires proviennent de la destruction et du transport des roches préexistantes.

#### 422.1 Porosité des roches non consolidées

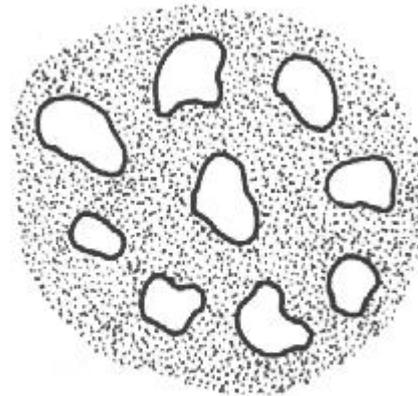
Les cailloux, les graviers, les sables, présentent une porosité d'environ... 35 %. Les vases quant à elles, atteignent... 90%. Cette porosité entraîne une circulation **rapide** de l'eau.

L'**argile** possède une "porosité de pore", c'est-à-dire une micro-porosité **ET** une porosité colloïdale. Terzaghi a estimé ces pores à  $0,05 \mu$ . Une argile peut donc se gonfler d'eau jusqu'à 100 et 290 % son volume ; mais la circulation de l'eau y restera **très lente**.

#### 422. 2 Porosité des roches consolidées

##### •Grès

Il s'agit de grains de quartz baignant dans un ciment siliceux ou calcaire. Il s'avère très peu poreux... 8 %. Cf. schéma infra. SAUF si le ciment est incomplet ; à ce moment-là, la circulation de l'eau y devient **rapide** (porosité de fissure).



cf. schéma ci-contre

Enseeiht Toulouse

Gerber

##### •Marne

Dans ce cas, les grains de calcaire baignent dans un ciment argileux. Comme pour l'argile, on se trouve en présence de formation à "micro porosité + porosité colloïdale"... 50 % où l'eau circule **très lentement**.

### 42. 2 Région sédimentaire de type karstique

#### 422. 1 Porosité du calcaire

Le calcaire compact ne possède qu'une très faible porosité ... 1 %

Mais le calcaire avec fissures, chenaux, cavernes... peut contenir de véritables rivières souterraines.

#### 422. 2 Circulation dans un faciès karstique<sup>87</sup>

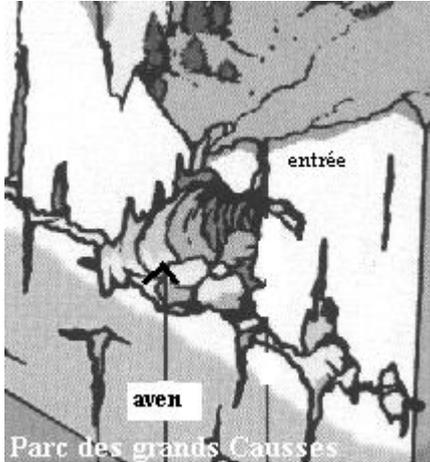
L'on doit au forézien Martel l'étude de la circulation de l'eau dans ce type de faciès, qu'il a explicité dans son livre :

<sup>87</sup> faciès d'une région de calcaire et dolomites possédant une topographie souterraine particulière due à la dissolution et au cheminement des eaux subséquent. Le Karst est une montagne de Slovénie.

" Applications géologiques de la spéléologie" écrit à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle.

### 422. 3 Entrée de l'eau

• **Par les avens** : Dans les causses rouergats et languedociens (Méjean, Sauveterre, Comtal, Noir et Larzac) comme dans le causse quercynois (Grammat) l'on rencontre ces cavités profondes dont le plus célèbre s'appelle l'aven Armand.



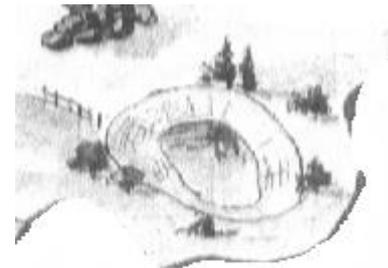
L'épaisseur de roches traversées dépasse souvent 500 mètres et les explorateurs le plus audacieux n'ont pas encore réussi à effectuer la traversée complète de tous les grands causses.

cf. coupe ci-contre dans le Larzac où l'on voit depuis l'entrée à la surface du sol, la profonde ramification

• **Par les gouffres**: Il s'agit de creux circulaires en forme de cirque, produits en général par l'affaissement du plafond d'une caverne.

Il ne faut pas les confondre avec les lavognes en Rouergue sur le causse du Larzac qui se définissent comme des bassins circulaires créés par l'homme dont le fond est en pierre et destinés à l'abreuvement des moutons.

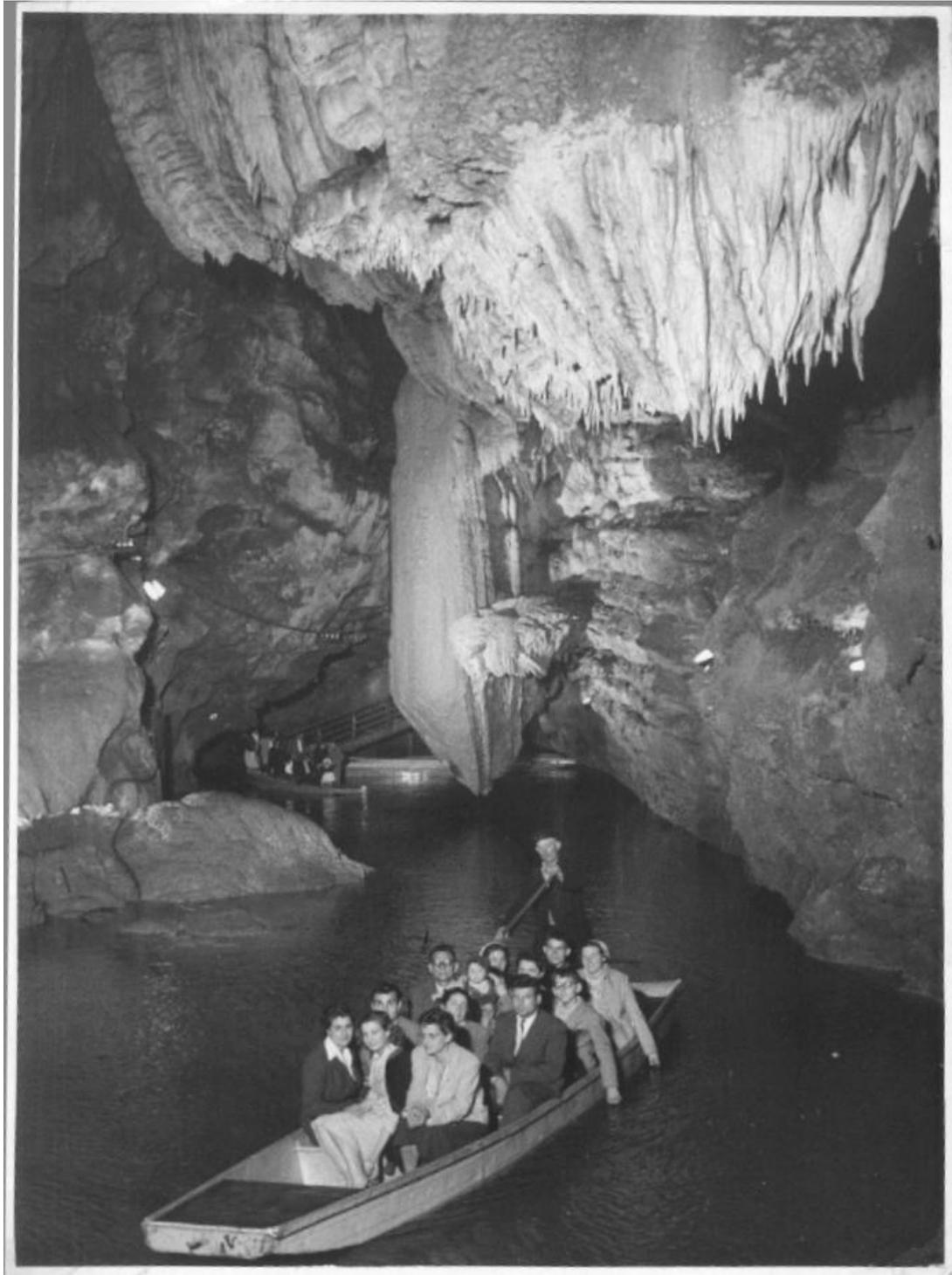
Cf. croquis ci-contre



lavogne

Bouloc

Le plus célèbre des gouffres, celui de Padirac dans le Causse du Quercy, abrite une rivière souterraine.  
voir photographie *infra*.



•**Par les pertes** : La rivière disparaît en un endroit donné .

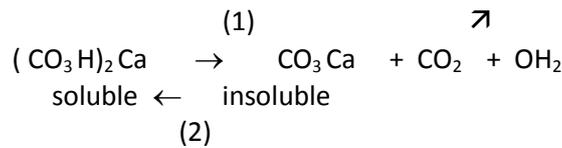
Ainsi la Valserine, tributaire du Rhône, (montagne du Jura) disparaît à Bellegarde aux Pont des Oulles ,

De même à Cornus sur le Larzac la Combe disparaît au lieu dit Caussanuéljouis.

L'incendie des usines Pernod à Pontarlier a entraîné l'apparition d'un mélange d'eau et de pastis dans la rivière le Doubs ..... ! indiquant que cette rivière possédait un cours souterrain important.

#### **422. 4 Action de l'eau**

En circulant de caverne en caverne l'eau agira **mécaniquement** en érodant les roches, mais aussi **chimiquement** selon l'équilibre calco-carbonique.



Dans le fond, l'équation se déplace dans le sens (1) ; les gouttes formeront des stalactites<sup>88</sup> et le gaz carbonique se dégagera pouvant intoxiquer les spéléologues.

Près de la surface d'entrée, l'équation se déplace dans le sens (2) la roche se dissout et la caverne s'élargira.

#### 422. 5 Sortie de l'eau

"Benedette le voci tante ch'io,  
"Chiamando il nome di mia donna ho sparte  
"E i sospiri e le lagrime e il desio."<sup>89</sup> Petrarca (1340)

Souvent la rivière resurgit non loin, cf. la Valserine, mais souvent la nappe souterraine s'en ira sourdre parfois loin de son point d'entrée. Ainsi les sources de la Sorgue (Fontaine de Vaucluse) jaillissent au bas d'un rocher dans un vallon fermé (Val/Cluse). Elles inspirèrent le poète italien Pétrarque pour le sonnet à Laure "ad fontem Sorgiae" cité en exergue.



L'eau de la Sorgue proviendrait du mont Ventoux ; après être tombées sur un bassin de 72 km de long par 18 km de largeur, les eaux infiltrées convergeraient vers un calcaire fissuré dont le point bas est la fontaine de Vaucluse.

A Varkiza, près d'Athènes, il existe un petit lac dont la température reste constante été comme hiver car il est alimenté par de puissants courants souterrains qui font résurgence à cet endroit.

#### 422. 6 Conséquence pour l'eau potable

- La présence de **carbonate de calcium** dans l'eau entraîne des conséquences défavorables pour
  - le savon qui mousse mal, car auparavant il doit servir à précipiter des stéarates<sup>90</sup> insolubles,
  - les légumes qui cuisent mal, par exemple le pois chiche car avant d'être cuite la pectine autour sert à précipiter des pectates insolubles,
  - les tissus qui deviennent fragiles.

Par contre elle s'avère bonne pour fabriquer de la bière et protéger les tuyaux par dépôt de tartre.

- La **salubrité** de l'eau s'avère fréquemment mauvaise, car elle n'est pas filtrée (ruisseau souterrain).

#### 42. 3 Région sédimentaire de type alluvionnaire

##### 423. 1 Définition

La nappe se situe cette fois dans les alluvions quaternaires d'un cours d'eau.

##### 423. 2 Description

Les dépôts quaternaires où siège l'horizon aquifère alluvial sont classés en deux types, représentés dans la coupe infra concernant la région valentinoise :

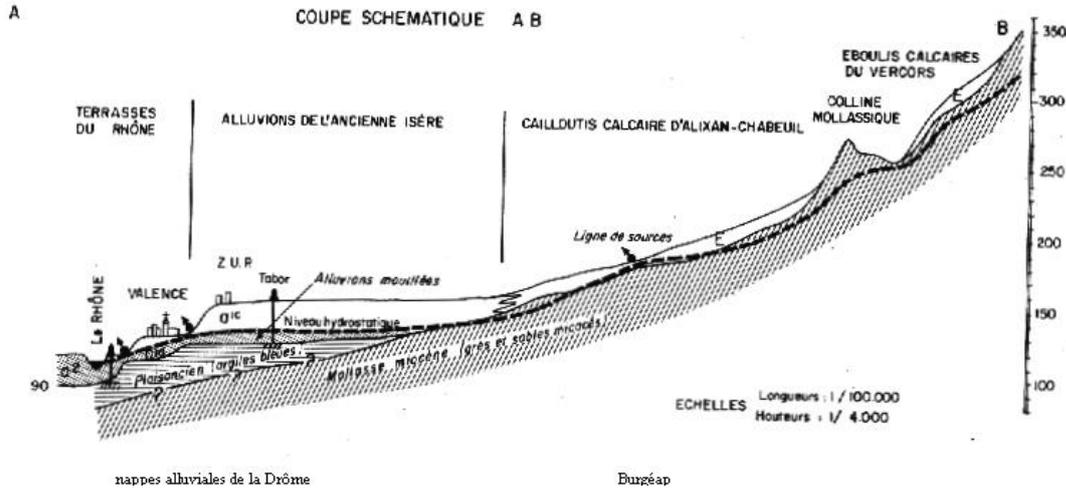
<sup>88</sup> η σταγόνα : la goutte

<sup>89</sup> Bénies soient les voix que j'ai tant appelées, le nom d'ema dame et les soupirs et les larmes...

<sup>90</sup> les savons sont des sels d'acides gras : (bougie) stéarine + OHNa → savon + glycérine (alcool)

- **lesterrasses anciennes** qui se superposent depuis le Rhône en direction du Vercors et dont certaines nappes sont "perchées" (nappe libre surmontant une nappe libre de grande extension) composées d'éléments calcaires à gangue sableuse.

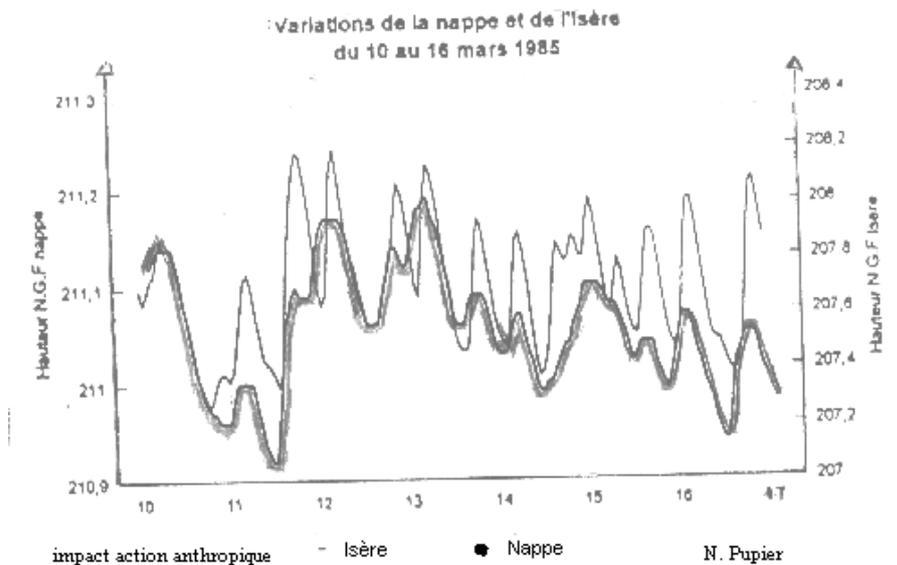
- **lesalluvions récentes** où la nappe alluviale évolue dans une formation où l'on retrouve de haut en bas : limon, sable, gravier.



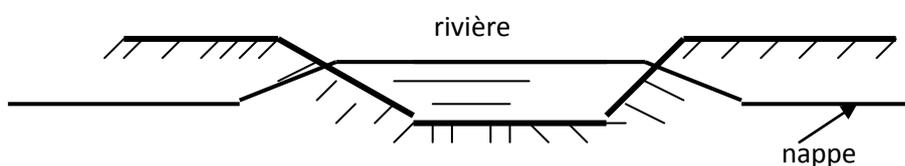
### 423. 3 Ecoulement de la nappe

Si les nappes gisant dans les terrasses anciennes restent liées à la pluviométrie, quant à la variation de leurs niveau mesurés par piézomètre, celles s'écoulant dans les alluvions récentes subissent en plus :

- **le contrecoupe l'hydrogramme** du cours d'eau ainsi que le montre pour l'Isère Cf. le graphique infra.

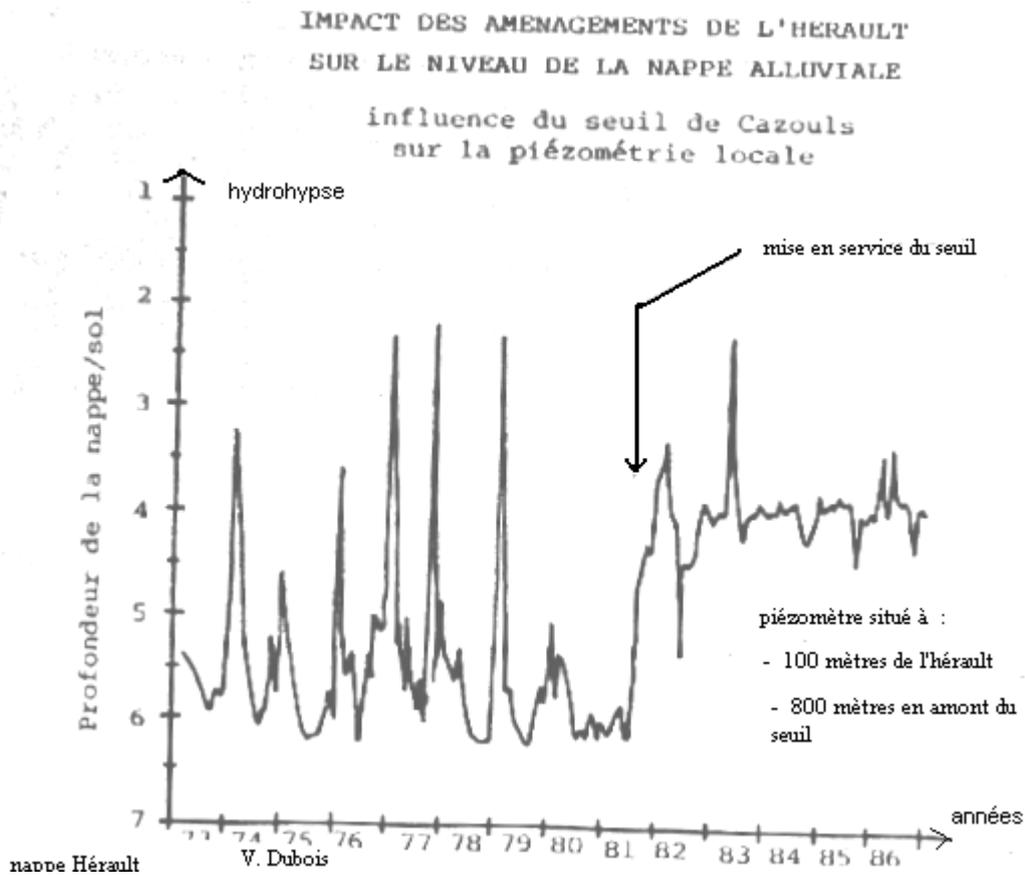


le profil en travers infra

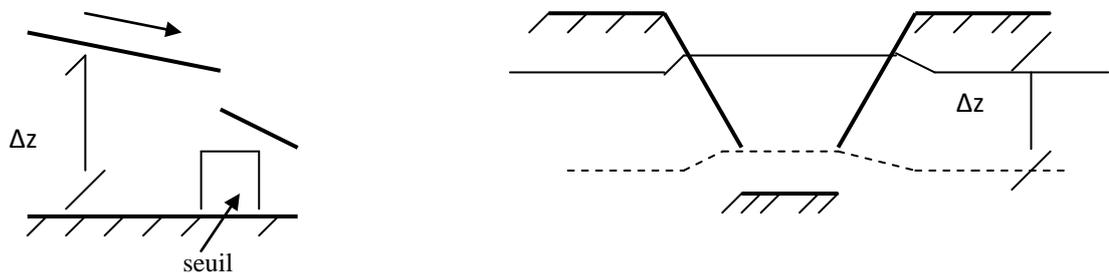


- l'impact du profil en long du cours d'eau, **effet de seuil**, dans le cas du seuil de Cazouls sur l'Hérault.

cf. graphique infra



f. profil en long et profil en travers infra



#### 423. 4 Conséquence pour l'eau potable

La circulation de l'eau dans une formation alluviale est **rapide**, les débits atteignent des valeurs élevées et, partant, ces nappes sont très recherchées pour **l'alimentation en eau potable**, d'autant que les sédiments sableux jouent un rôle de filtre favorable à la propreté de l'eau, ce qui n'est pas le cas dans les eaux provenant des zones karstiques.

## 5 Fonctionnement d'un horizon aquifère

### 51 Alimentation

L'eau qui circule dans un horizon aquifère déterminé peut provenir de quatre origines principales :

#### 51.1 Alimentation directe par la pluie.

Laquelle tombe sur la surface propre de la nappe ; ce mode d'alimentation le plus connu se manifeste dans les zones à terrains alluviaux très perméables et les nappes de type phréatique libre.

Le **calcul de la quantité d'eau** qui rejoint la nappe, nécessite de planimétrer la surface infiltrante, ce qui s'avère aisé et d'apprécier la hauteur de pluie utile à la nappe ce qui implique de disposer de mesures lysimétriques<sup>91</sup>.

#### 51.2 Infiltration indirecte

Dans une zone alluviale perméable il peut arriver :

- des eaux ayant ruisselé sur des affleurements voisins de roches peu perméables (mollasse par exemple)
- des eaux de ruisseaux d'origine lointaine à leur débouché dans la zone alluviale perméable.

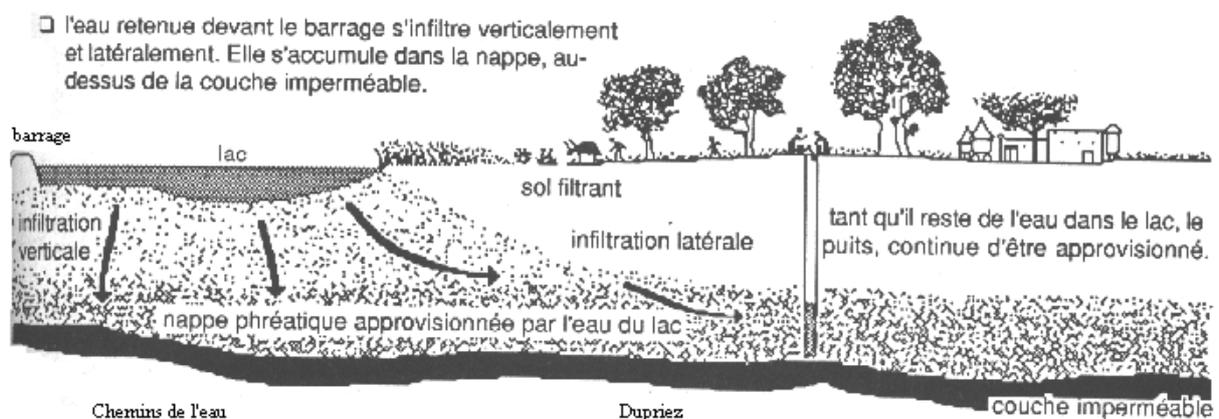
#### 51.3 Apport latéral des nappes voisines

Que cet apport soit visible (source) ou occulte (déversement souterrain) il ne peut être chiffré qu'à partir du bilan de la nappe d'origine de l'apport.

#### 51.4 Apport artificiel

Ainsi l'approvisionnement de la nappe phréatique à partir de la retenue réalisée sur un sol filtrant,

cf. schéma infra



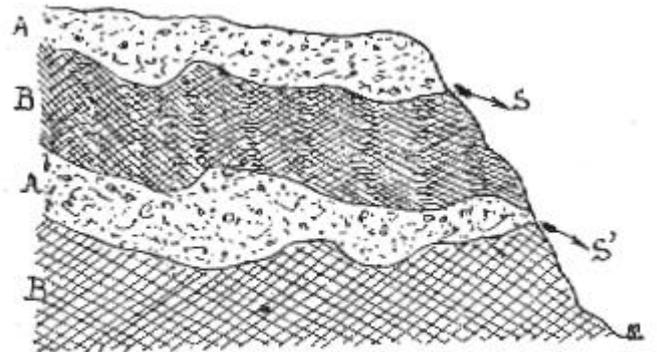
<sup>91</sup>λύω : dissoudre - το μέτρο : la mesure

## 52 Exutoire

L'émergence d'une nappe se manifeste par une **source**. En compulsant les dictionnaires et les encyclopédies, nous voyons que les Romains se servaient du mot "fons" qui donna fontaine en français. Notons qu'en franco-provençal, la source de Saint-Galmier donnant la célèbre eau de Badoit s'appelle "fontcaude" ou source chaude.

L'on peut ainsi définir la source comme :  
..... l'orifice d'un cours d'eau souterrain qui verse au dehors, l'eau que sa pente y conduit par une affluence ménagée.

Le croquis ci-contre indique  
la formation de la source S  
et celle de la source S'



— Formation des sources S et S' dans une vallée d'érosion.  
A couches perméables.  
B couches imperméables.

Art des sources

E.S Auscher

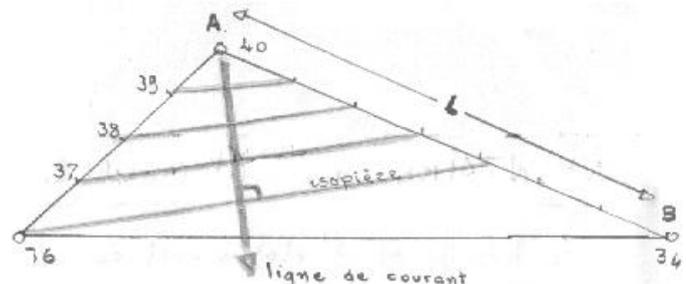
En 1859, l'abbé Paramelle dans son livre " L'Art de découvrir les sources " précisait que pour former une véritable source, l'eau doit :

- être réunie en un courant assez gros pour être sensible
- être en mouvement
- avoir un mouvement de courant durable, donc ne pas exister seulement après un épisode pluvieux.

## 53 Etude piézométrique

### 53.1 Etablissement des cartes en courbes izopièzes <sup>92</sup>

Pour une **période déterminée** l'on reporte les niveaux piézométriques des points d'eau connus.  
Cf. croquis infra



Ensuite, en traçant les lignes d'égal niveau piézométrique l'on obtient la carte en courbes isopièzes de la surface libre de la nappe.

**N.B.** Si l'on ne dispose pas d'assez de points, on ajuste les courbes en se basant sur les caractères généraux de l'écoulement.

### 53.2 Interprétation des cartes en courbes isopièzes

<sup>92</sup>ίσος, -η, -ο : égal ; πιέζω : presser

**532.1 Généralités**

Après avoir calculé la profondeur de la surface piézométrique . On trace aussi les **lignes de courant** droites de plus grande pente perpendiculaires aux droites isopièzes Cf. croquis supra.

La vitesse effective s'écrit :

$$V = K \cdot i$$

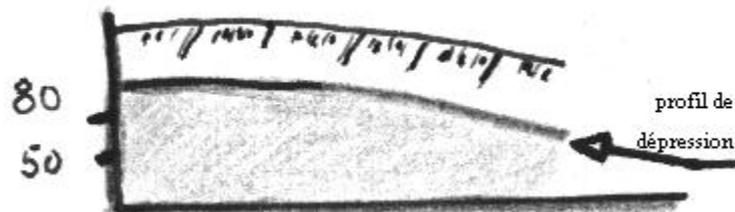
$$K = \text{perméabilité hydraulique}$$

$$i = \frac{HA - HB}{L} \quad (\text{gradient})$$

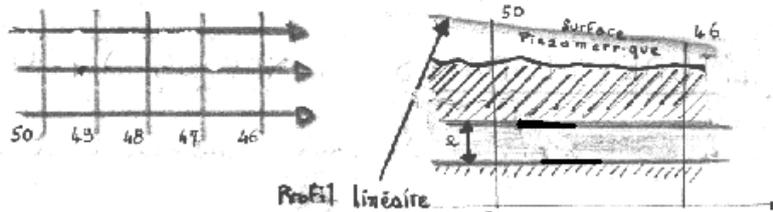
avec  $i = 0,0048$ , une faible perméabilité  $v = 2,8$  mètres/an

**532. 2 Détermination du type de nappe**

• **Nappe libre cylindrique** : Dans un écoulement à deux dimensions si l'on analyse dans un plan passant par une ligne de courant, la surface piézométrique présente un aspect cylindrique. Cf. croquis infra



- **Nappe libre radiale** : En ce cas, la surface piézométrique offre une allure conique avec des filets liquides convergents ou divergents.
- **Nappe captive** : Cette fois, les courbes isopièzes sont réparties de façon équidistante.



**532. 3 Détermination et interprétation des profils de dépression**

A partir d'une coupe hydrogéologique on peut construire le profil de dépression.

• **Profil de dépression f ( régime d'écoulement )**

L'on se trouve devant un écoulement UNIFORME si, dans une tranche verticale, selon la ligne de courant, la vitesse  $V_1$  des filets liquides égale  $V_2$ , la vitesse dans une tranche transversale selon les isopièzes

En ce cas, cf. la *nappe captive* supra, le profil de dépression devient LINEAIRE.

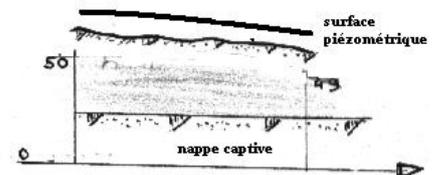


Au contraire si  $V_1 \neq V_2$  l'écoulement devient NON UNIFORME et l'on se trouve avec un profil de dépression

PARABOLIQUE..

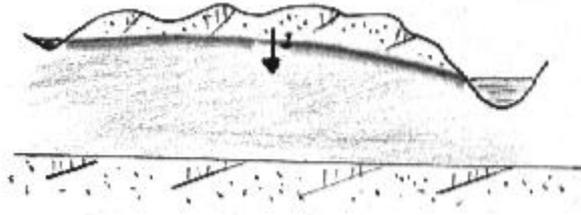
Cf. croquisci-contre

$$y^2 = \frac{g}{L} \log x +$$



$C^{te}$   
 $\pi K$

Ou bien avec un profil de dépression ELLIPTIQUE, pour une *nappe libre* cf. croquis infra



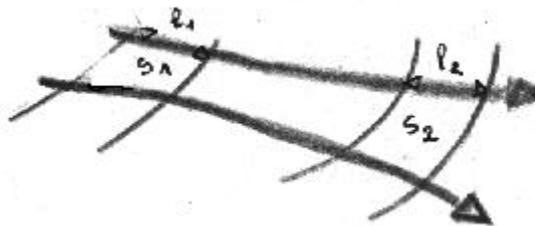
•Profil de dépression f ( perméabilité du terrain aquifère )

Dans le croquis infra, le débit Q peut s'écrire

$$Q = S_1 V_1 = S_2 V_2$$

$$Q = S_1 K_1 i_1 = S_2 K_2 i_2 \quad (\text{Darcy})$$

donc  $\frac{K_1}{K_2} = \frac{i_2}{i_1} \cdot \frac{S_2}{S_1}$



⊙

Le grad. hydraulique est inversement proportionnel au coefficient de perméabilité à débit constant.

⇒

Mais grad. hydraulique = pente du profil de dépression. grad h = i = h/l

Si  $K \searrow$  dans le sens de l'écoulement, pente  $\nearrow$  on voit un **resserrement** des isopièzes. Dans une nappe captive, le profil devient parabolique.

Si  $K \nearrow$  dans le sens de l'écoulement, pente  $\searrow$  on remarque un **élargissement** des isopièzes. Dans une nappe captive le profil devient hyperbolique.

•Profil de dépression f (débit d'écoulement )

⊙

Si  $Q \nearrow$  en  $Q_1$  grad. hydraulique  $\nearrow$ , courbure  $\nearrow$  constant

à coefficient de perméabilité K

$$Q_1 = S_1 K i_1$$

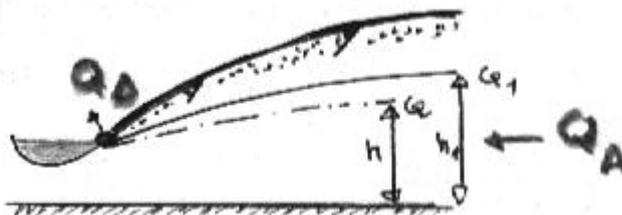
$$Q_2 = S_2 K i_2$$

donc  $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{S_1 i_1}{S_2 i_2}$

Cf. croquis ci-contre

⊙

Le grad hydraulique est proportionnel au débit si  $Q \nearrow$  dans



le sens de l'écoulement, on constate le resserrement des isopièzes (équipotentiellles).

**DRAINAGE** : Le niveau de base détermine la cote inférieure d'équilibre du profil de dépression. Cette cote reste fixe pour les sources et les puits,  $Q_{\text{drainage}} = C^{te}$

**ALIMENTATION** : Elle détermine le point haut du profil,  $Q_{\text{alimentation}}$  reste f (évapotranspiration, infiltration)

Dans une section transversale soit  $Q$  le débit imposé par les conditions hydrogéologiques et si  $K = C^{te}$

Si  $Q = Q_{\text{Alimentation}} > Q_{\text{Drainage}}$  niveau piézométrique ↗

$Q = Q_{\text{Alimentation}} < Q_{\text{Drainage}}$  niveau piézométrique ↘

• **Profil de dépression f ( structure milieu aquifère )**

SECTION D'ECOULEMENT



Si la largeur se resserre, grad hydraulique ↗ à débit constant



Si la largeur augmente grad hydraulique ↘ à débit constant

PENTE ET MORPHOLOGIE DU SUBSTRATUM

Si la pente va dans le sens de l'écoulement

la surface piézométrique sera une droite si  $h = \frac{Q}{K \sin i}$

$K \sin i$

une parabole si  $h < \frac{Q}{K \sin i}$

$K \sin i$

une hyperbole si  $h > \frac{Q}{K \sin i}$

$K \sin i$

Critères	sens de variation	Pente du profil de dépression i	Espacement des isopièzes
Perméabilité K	↗	↘	↗
	↘	↗	↘
Débit Q	↗	↗	↘
	↘	↘	↗
Section S	↗	↘	↗
	↘	↗	↘

La pente du profil de dépression ↗ et ↘ en f (débit) Q et ↘ si la perméabilité et la section S ↗

**53.3 Critères d'appréciation rapide des courbes isopièzes à partir d'une carte**

**533. 1 Au vu de la courbure des isopièzes**

• Type à concavité orientée vers l'**amont** : cf. sud de la carte hydrogéologique du Jabron

Cela présage un bombement de la surface libre, un haut niveau piézométrique, une forte courbure du profil de dépression.

donc à  $Q = C^{te}$  K sera faible, en effet on constate que K tend vers  $10^{-5}$  m/s

à  $K = C^{te}$  Q sera fort

• Type à concavité orientée vers l'**aval** : cf. vallée du Jabron

Cela fournit l'indice d'un débit faible ou d'un coefficient de perméabilité K fort à débit constant, en effet l'on remarque une augmentation de K qui tend vers  $10^{-3}$  m/s

**533. 2 Au vu de l'espacement des courbes isopièzes**

→

Il renseigne sur le grad hydraulique et sur le profil de dépression

- Type à espacement **se resserrant** : cf. sud de la carte

Elles sont serrées,  $l \searrow$ , donc  $h / l \nearrow$  c.q.e.v. pente = 40 / 1000 et à débit constant ce peut être le reflet d'un coefficient K faible, c.q.e.v. puisque le coefficient de perméabilité K tend vers  $10^{-5}$  m/s

- Type à espacement **s'élargissant** : cf. vallée du Jabron

Elles sont desserrées,  $l \nearrow$ , donc  $h / l \searrow$  c.q.e.v. pente = 8 / 1000 et à débit constant ce peut être le reflet d'un coefficient K fort, c.q.e.v. puisque le coefficient de perméabilité K tend vers  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s

### 53. 4 Autres indications en cartographie des eaux souterraines

On ne se contente pas des courbes isopièzes représentant le potentiel hydraulique, en effet après avoir calculé la profondeur de la surface piézométrique on peut tracer la carte de la profondeur de la nappe représentées par des **hydroïsohypses**<sup>93</sup>

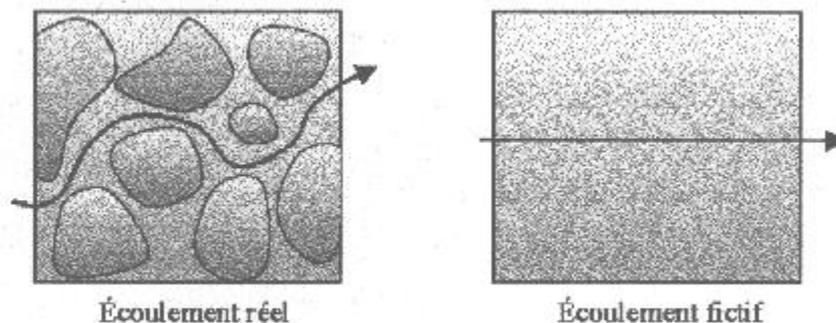
L'on rajoute aussi : la résistivité, la température, la composition chimique, etc.

## 54 Modes de circulation de l'eau

### 54.1 Caractéristiques générales

Du fait que la section d'écoulement n'est pas du tout celle de l'ensemble du massif sol, l'eau devra circuler plus rapidement dans les cheminements disponibles (effet de tortuosité).

Cf. schéma infra



- *Écoulement réel et écoulement fictif*

Ecole polytechnique de Lausanne

Musy

De ce fait, la circulation s'effectuera selon différents sens.

<sup>93</sup> το ύψος : la hauteur, ίσος,-η,-ο : égal, το ύδωρ : l'eau

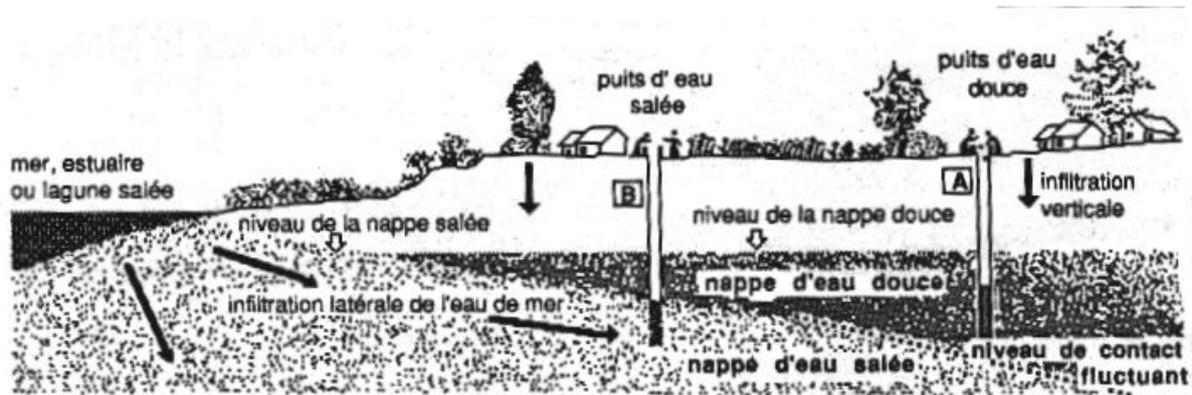


## 54. 2 Types de circulation

### 542.1 Mouvement vertical et horizontal

La superposition de deux nappes, d'eau douce et d'eau salée, que l'on rencontre fréquemment dans les zones côtières illustre bien les circulations de l'eau qui s'effectuent horizontalement (eau de mer) et verticalement (eau de pluie)

Cf. croquis infra



□ l'eau salée de la mer s'infiltré latéralement sous les terroirs côtiers. L'eau douce des pluies s'infiltré verticalement dans ces terroirs; plus légère, elle reste posée au-dessus de la nappe salée. Deux puits de même profondeur peuvent donc être alimentés l'un par de l'eau douce, l'autre par de l'eau salée.

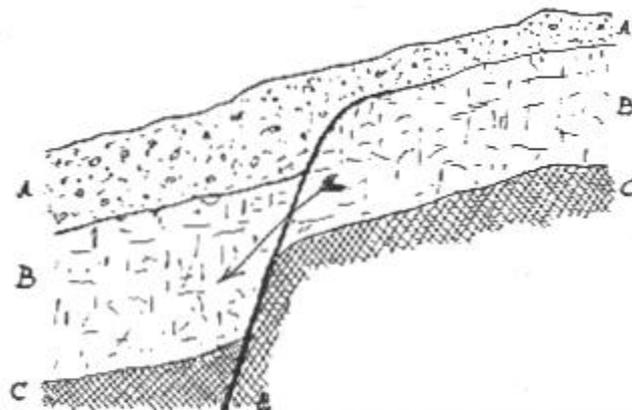
Les chemins de l'eau

H. Dupriez

### 542.2 Mouvement oblique

Fréquemment, une faille interrompt la continuité des terrains de l'horizon aquifère. La circulation continuera et les eaux d'infiltration passeront du côté droit au côté gauche de la faille.

Dans le schéma infra, le niveau imperméable constitué par la couche C d'argile, recevra toutes les eaux des couches sableuses A et des calcaires perméables B.



— Circulation des eaux dans les terrains bouleversés par des failles.

- A couches sableuses perméables.
- B calcaires fossilifères perméables.
- C argiles imperméables.

Art des sources

E.S Auscher

## 6 Evaluation de la réserve et de la ressource

### 61 Généralités

#### 61. 1 Définitions

**611. 1 Réserves** : Elles représentent le volume d'eau stockée

**611. 2 Ressources** : Elles constituent la partie exploitable des dites réserves

#### 61. 2 Rôle des différents paramètres

##### 612. 1 Structures géologiques

Ces structures indiquent le volume total des assises aquifères

##### 612. 2 Conditions hydrogéologiques

Elles conditionnent le type de nappe, libre ou captive, la surface piézométrique indiquant la zone de terrain saturé.

#### 61. 3 Caractéristiques hydrogéologiques

Seule, une portion de volume de terrain aquifère est occupée par l'eau gravitaire libérable par des moyens économiques. Cette portion d'eau libre est déterminée ainsi :

- dans les nappes **libres** par la **porosité efficace**
- dans les nappes **captives** par le **coefficient d'emménagement**

#### 61. 4 Classification des réserves naturelles

Elles sont considérées comme

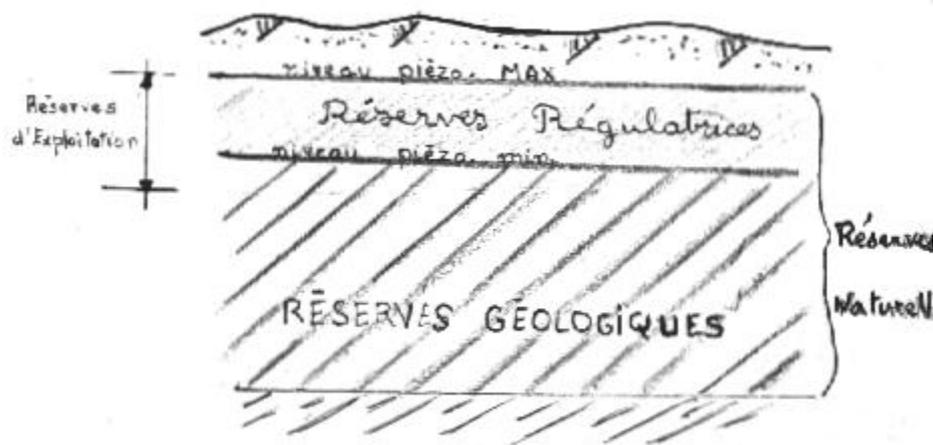
##### 614.1 Régulatrices

Eau libre emmagasinée fonction de la saison

##### 614.2 Géologiques

Le reste des réserves ; il peut s'agir à la limite, de l'eau fossile (exploitée dans le désert de Libye)

Cf. figure infra



## 61. 5 Classification des ressources

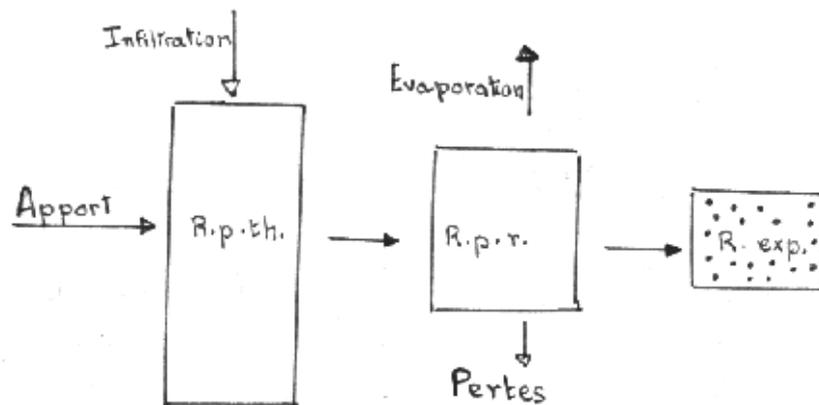
Elles se répartissent entre :

### 615. 1 Ressources potentielles théoriques

### 615. 2 Ressources potentielles réelles

### 615. 3 Ressources exploitables

Cf. croquis infra



## 62 Programme d'exploitation des ressources

### 62. 1 Calcul des réserves

Il se révèle indispensable pour déterminer les ressources

#### 621. 1 Critères des réserves naturelles

Il faut tenir compte :

- des dimensions de l'horizon aquifère, lequel reste fonction du toit du substratum et de la surface piezométrique
- de la porosité utile pour les nappes libres (1) et du coefficient d'emmagasinement pour les nappes captives (2) moyennant quoi

le **volume d'eau libre utilisable** est obtenu en multipliant le volume de l'horizon aquifère par la porosité utile (4) OU le volume de l'horizon aquifère par le coefficient d'emmagasinement. Ainsi si ledit coefficient d'emmagasinement atteint  $5.10^{-4}$  cela signifie que le volume d'eau emmagasiné s'élève à  $0,5 \text{ l/m}^3$  roches.

#### 621. 2 Critères des réserves régulatrices

- Etude des variations du niveau piézométrique

$$\Delta R = S \cdot \Delta h$$

$\Delta R$  : variation du volume de réserve unitaire, indice d'emmagasinement

$S$  : coefficient d'emmagasinement ou porosité utile

Cf. schéma infra



Impact sur les réserves

Si  $S = 10\%$   $\Delta h = 2\text{ m}$  et  $\Delta R = 200\text{ mm}$

Si  $\Delta h = 2,5\text{ m}$   $\Delta R = 250\text{ mm}$

## 62. 2 Calcul des ressources

### 622.1 Ressources potentielles réelles :

Si on possède  $\Delta R$  il faut en plus tenir compte de la surface totale et de la surface perdue pour obtenir la surface utile.

### 622. 2 La ressource exploitable :

$R = V.S$  (  $V$  volume du terrain aquifère entre surfaces extrêmes)

### 622. 3 Cas des nappes liées aux rivières. Courbe de tarissement

- Elles fournissent la capacité de la nappe puisqu'en période de sécheresse elle alimente la rivière selon la loi de Maillet :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \text{ si } Q_0 = 2,6 \text{ puis } Q_{306 \text{ jours}} = 1$$

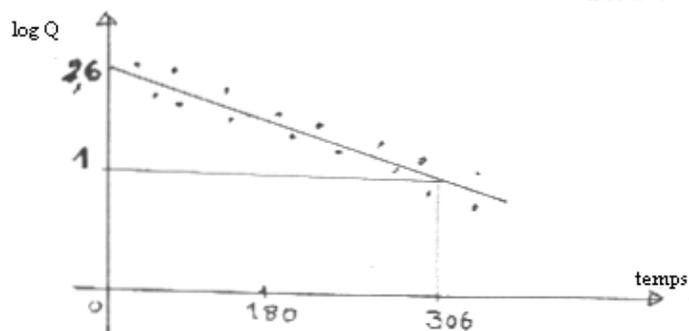
$$\ln Q_t = \ln 2,6 - \alpha t$$

$\ln 1 = \ln 2,6 - 306 \alpha$  on calcule  $\alpha$

il vient alors

$$Q_t = 2,6 e^{-0,0312 t} \text{ (tarissement de la rivière = vidange de la nappe)}$$

Cf. graphique infra



- le volume des réserves régulatrices correspondant à la vidange de la nappe sera donné par

$$\text{Volume} = \int_0^{\infty} Q_t dt = Q_0 \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} dt$$

En se souvenant que :

$$Q_0 \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} dt = Q_0 \left[ -\frac{e^{-\alpha t}}{\alpha} \right]_0^{\infty} = Q_0 \left[ 0 - 1 \right] \left( -\frac{1}{\alpha} \right)$$

$\alpha$

$\alpha$

$$\text{Volume} = \frac{Q_0}{\alpha}$$

$\alpha$

## 62. 3 Critères de contrôle

### 623. 1 Variation du niveau piézométrique

Il permet de contrôler l'épuisement des réserves. Cet épuisement sera évidemment plus fort pour les nappes captives que pour les nappes libres.

### 623. 2 Fluctuation du débit des sources

Elle peut donner une idée sur le degré d'épuisement des réserves

### 623. 3 Alimentation des nappes

L'alimentation directe est évaluée par **l'infiltration efficace**, c'est-à-dire : " la fraction de la quantité d'eau infiltrée depuis la surface du sol, qui - après avoir traversé la zone non saturée - parvient effectivement à la zone saturée ".

# **Relation eaux souterraines / eaux superficielles . Bilan hydrologique**

## **1Relation nappe alluviale et rivière**

### **11 Intérêt de la connaissance de cette relation**

### **12 Mesures**

- 12. 1 Lieux des mesures
- 12.2 Moyens des mesures

### **13. Différents types de connexion nappe/rivière**

- 13. 1 Types liés à l'hydraulique
- 13. 2 Types liés à l'hydrogéologie
- 13. 3 Types liés aux crues
- 13. 4 Types liés à la potamologie

## **2 Sources - Résurgences – Pertes**

### **21 Sources**

- 21.1 Définition
- 21.2 Source diaclasienne
- 21.3 Source de déversement
- 21.4 Source d'émergence ou de talweg
- 21. 5 Source intermittente

### **22 Résurgences**

### **23 Pertes**

## **3Bilan hydrologique**

### **31 Coup d'œil sur la répartition des eaux**

### **32 A l'échelle du globe**

- 32.1 Répartition spatiale
- 32.2 Les eaux souterraines
- 32.3 Le eaux continentales de surface
- 32.4 Temps de renouvellement
- 32. 5 Caractéristiques des cycles océanique et continental

### **33 A l'échelle d'une zone**

- 33.1 Cas de la Suisse
- 33.2 Cas d'une parcelle tunisienne

# 1 Relation nappe alluviale et rivière

## 11 Intérêt de la connaissance de cette relation

Les variations de niveau des cours d'eau **modifient** les cotes piézométriques de la nappe, sachant que 40 % des prélèvements d'eau proviennent des nappes alluvionnaires (alluviales).

- à l'échelle d'un bassin-versant, la connaissance approfondie des échanges nappe/rivière permet d'améliorer la gestion des ressources
- à l'échelle régionale, la détermination des transferts nappe/rivières est destinée à **prédire les hauteurs** de la nappe (conditions d'humidité, inondations) suite aux **modifications apportées** à la rivière par aménagement du lit.

## 12 Les mesures

### 12.1 Lieux de mesure

#### 121. 1 A l'échelle du bassin

Les relations nappe/rivière peuvent être mises en évidence à partir de l'analyse :

- des hydrogrammes de crue et des observations piézométriques,
- des interprétations de pompage sis à proximité de la rivière.

#### 121. 2 A l'échelle régionale

Ces échanges peuvent être identifiés à partir :

- de l'étude des hydrogrammes d'un cours d'eau
- des estimations effectuées par jaugeages différentiels

Signalons que des études anglaises ont montré que pour certains fleuves, la proportion d'eaux souterraines déversée dans leur lit représente ... 75 % du débit.

### 12.2 Moyens de mesure

#### 122. 1 Classiques

Par relevé des piézomètres pour les nappes et des limnigraphes pour les rivières.

#### 122. 2 Modélisation

Les modèles couplés calculent simultanément les cotes de la nappe et celles de la rivière. A l'échelle régionale, on utilise un modèle dit " unilatéral" où la rivière est simulée soit comme potentiel imposé SOIT comme un flux fonction de la différence de charge entre la nappe et la rivière.

#### 122. 3 Biologique

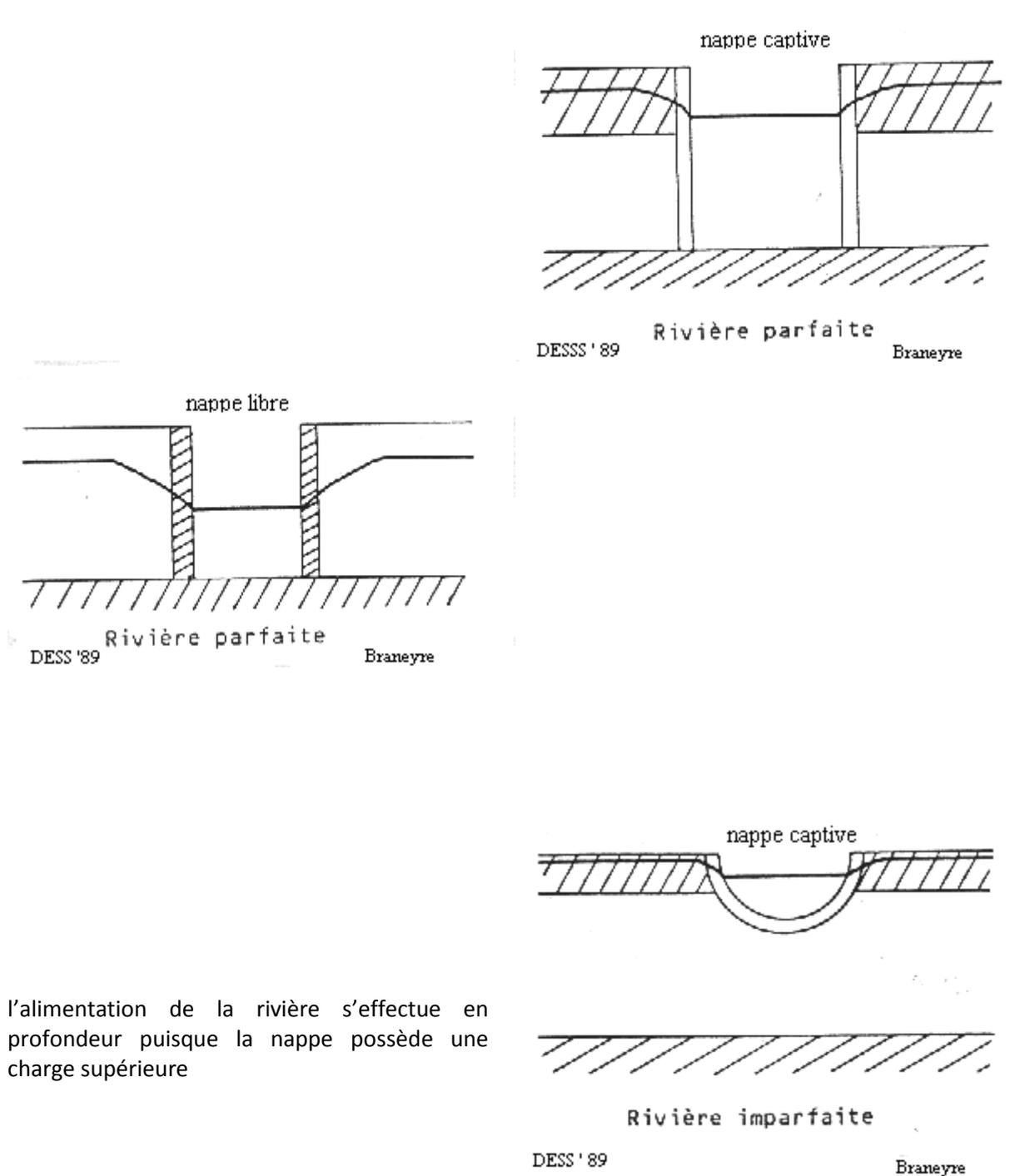
La recherche, puis la quantification de certains invertébrés résistant à la pollution industrielle, peuvent donner des indications.

## 13 Différents types de connexion nappe/rivière

### 13.1 Types liés à l'hydraulique

#### 131.1 Drainage de la nappe par la rivière

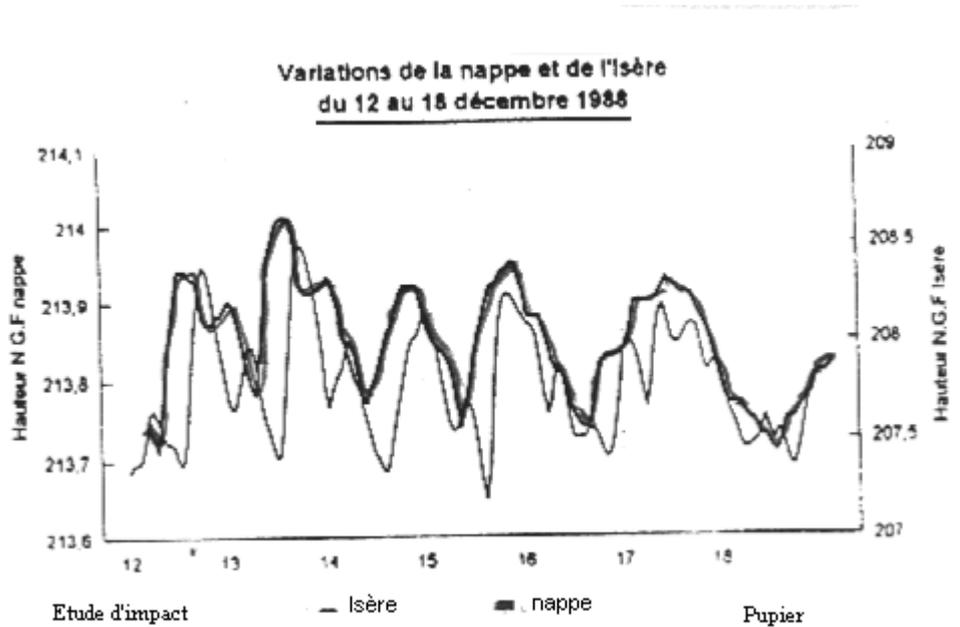
Dans ce cas les eaux souterraines s'écoulent vers le cours d'eau; comme l'indiquent les figures infra, aussi bien avec une nappe captive qu'avec une nappe libre.



l'alimentation de la rivière s'effectue en profondeur puisque la nappe possède une charge supérieure

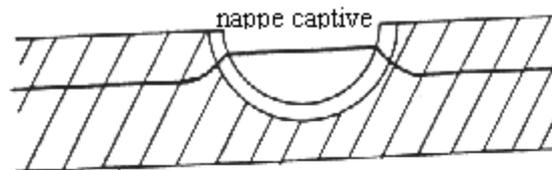
- Exemple de la nappe alluviale de l'Isère

A proximité de Grenoble, l'incision du lit de l'Isère (surcreusement) a entraîné une baisse de la nappe comme en témoigne le graphique infra



### 131. 2 Drainage de la rivière par la nappe

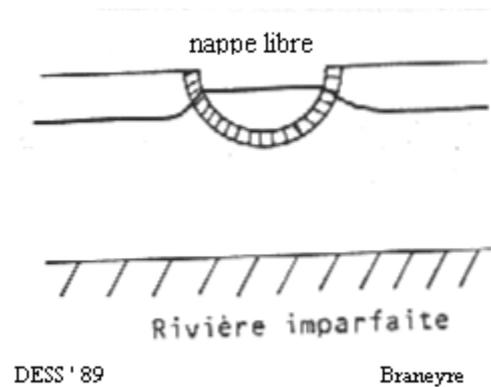
Cette fois le cours d'eau se vide dans la nappe. Ce phénomène joue aussi bien avec une nappe captive qu'avec une nappe libre. Cf. croquis infra



DESS' 89

Braneyre

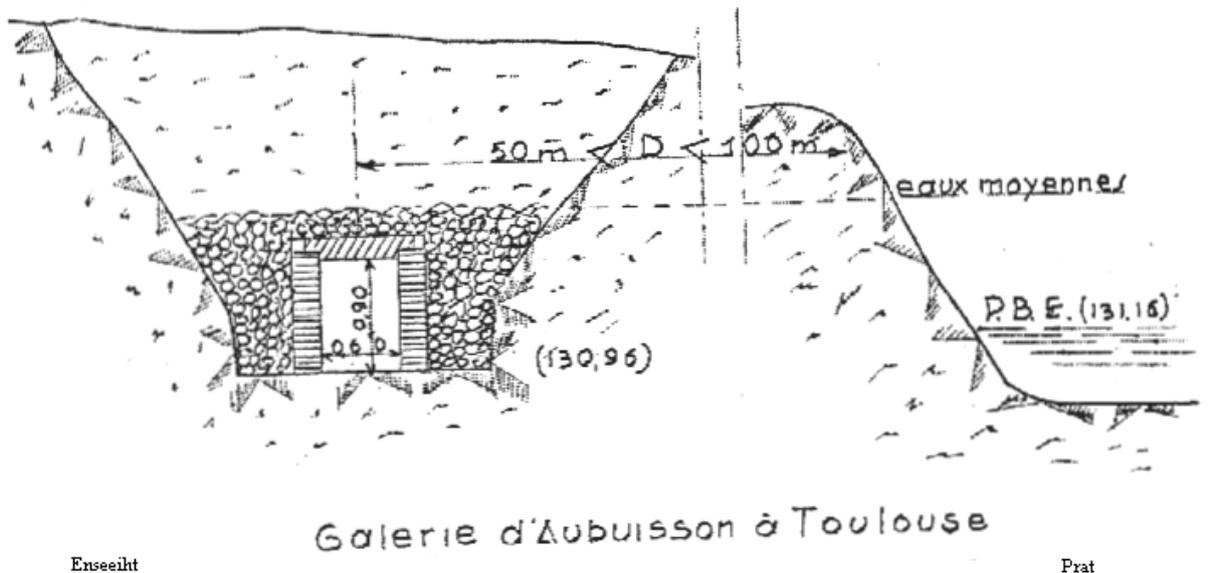
Cas où le substratum imperméable se situe au-dessous de la surface des eaux libres



- Exemple d'alimentation périodique à Toulouse

En 1821, l'ingénieur d'Aubuisson a appliqué le principe de la filtration naturelle de l'eau d'une rivière en construisant une galerie dans les masses alluvionnaires de la Garonne à la prairie des Filtres.

cf. croquis infra



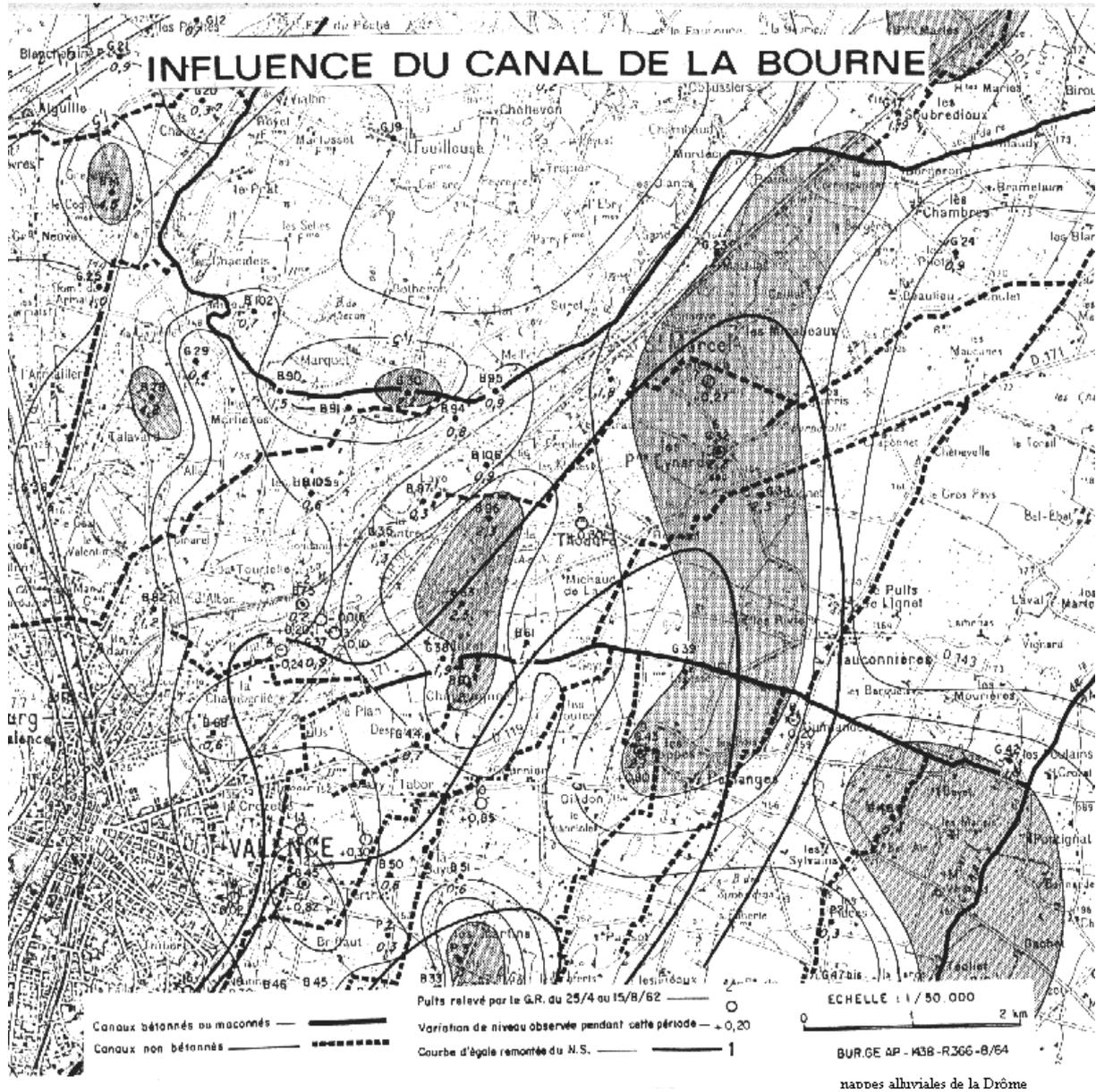
Cette galerie d'eau potable vit son débit décroître en raison du colmatage progressif des alluvions.

En période de basses-eaux, bien sûr, il n'existe pas d'apport du fleuve ; mais l'alimentation reprend ensuite ; voir la cote des eaux moyennes.

- Exemple d'alimentation permanente par le canal de La Bourne

Comme son nom l'indique, ce canal d'irrigation de la plaine de Valence est alimenté par une dérivation de l'eau de la rivière éponyme à sa sortie du massif du Vercors qu'elle traverse dans des gorges pittoresques appelées " Grands goulets ".

Il est constitué de canaux primaires et secondaires perreyés et de canaux tertiaires en terre où se situe l'essentiel des pertes. cf. carte infra



D'avril à octobre, ce canal débite  $3 \text{ m}^3 / \text{seconde}$  mais ..... 40 % de l'eau est perdu dans les canaux tertiaires et les branchements d'irrigation. Tout se passe comme si la nappe des terrasses de l'Isère, de la Véore et du Rhône recevait une alimentation complémentaire de .....  $0,75 \text{ m}^3 / \text{seconde}$ .

Si l'on veut bien considérer que la ville de Valence s'approvisionne en eau potable dans cette nappe, les fuites du canal s'avèrent bénéfiques pour elle, non seulement en QUANTITE ( $0,75 \text{ m}^3 / \text{seconde}$ ) mais en QUALITE car le degré hydrotimétrique<sup>94</sup> de l'eau du canal atteint 18° français et tend à adoucir l'eau potable issue de la nappe qui s'avère dure avec 30° français.

### 13. 2 Types liés aux crues

Quand l'eau monte dans la rivière, la **nappe remonte** également et cet effet se manifeste jusqu'à quelques centaines de mètres du cours d'eau.

<sup>94</sup> Le degré hydrotimétrique mesure le calcaire contenu dans l'eau

Après cessation de la pluie d'UNE PART et de l'écoulement hypodermique d'AUTRE PART, la rivière revient à son régime normal et bénéficie alors du déversement des eaux souterraines jusqu'au tarissement de ces dernières (selon la loi de Maillet cf. hydrologie), lequel tarissement indique la limite du potentiel de l'horizon aquifère alimentant la rivière.

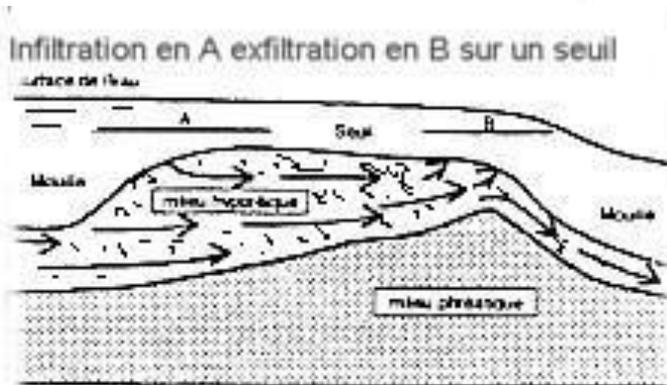
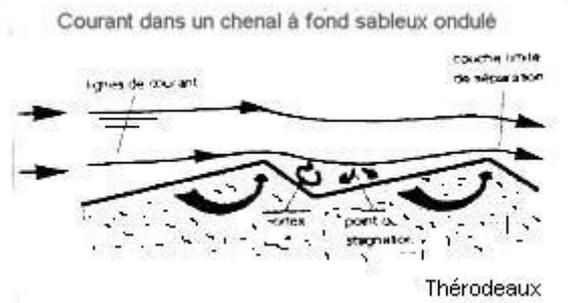
### 13. 3 Types liés à la potamologie

#### 133. 1 Circulation induite à l'échelle des seuils

Dans les deux croquis *infra* relatifs à l'écoulement

l'un sur fond sableux,

cf. croquis ci-contre



l' autre avec seuil

cf.. croquis ci-contre

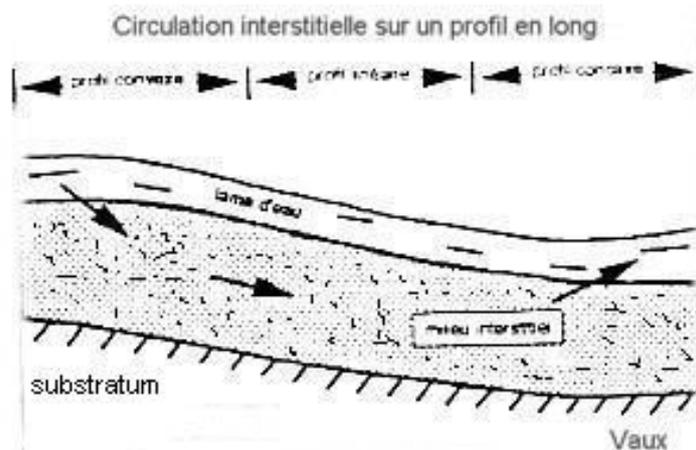
l'eau pénètre en A le milieu hyporègique et ressort en B, la nappe phréatique se situant en -dessous

l'infiltration ( rivière → nappe) et l'exfiltration (nappe → rivière) s'effectuent dans des zones précises.

#### 133. 2 Circulation induite à l'échelle du profil en long

L'on note que l'extrusion s'effectue dans la partie concave du profil et l'intrusion dans la partie convexe.

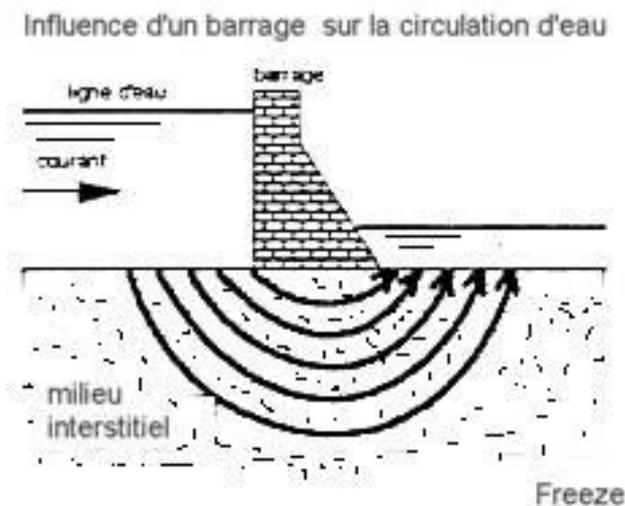
Cf. croquis ci-contre



### 133. 3 Circulation induite par les aménagements

L'influence des barrages, des seuils en palplanche ou en enrochement voire même des barrages édifiés par les castors, doit être prise aussi en considération.

Cf. croquis infra



### 133. 4 Circulation induite par la constitution des berges

Les berges et le radier de la rivière constituent la limite entre celle-ci et la nappe, ils peuvent posséder des pouvoirs filtrants différents, d'où dissymétrie dans les échanges d'une berge à l'autre.

### 133. 5 Circulation ralentie par la température de l'eau

en **hiver**, par température basse, la **viscosité** cinématique de l'eau  $\nu$  exprimée en  $m^2 / seconde$ , augmente en raison de la relation de Poiseuille :

$$\nu_t = \frac{\nu_0}{1 + \alpha t + \beta t^2}$$

$\nu_0$  = viscosité de l'eau à 0°

$\nu_t$  = viscosité de l'eau à t °

**N.B.** : Enfin il convient de signaler que des pompages proches du lit de la rivière entraîneraient une suralimentation de la nappe.

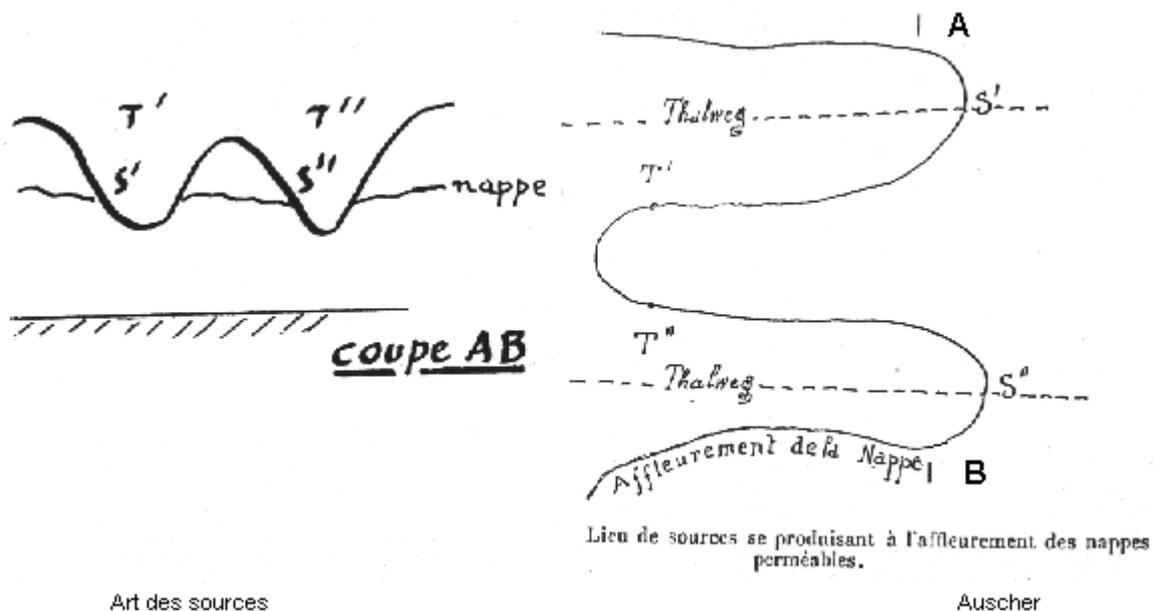
## 2 Sources, résurgences, pertes

### 21 Sources

#### 21.1 Définition

Les sources<sup>95</sup> constituent les exutoires naturels d'eaux souterraines qui s'écoulent donc dans le milieu perméable retenues par un lit imperméable et lorsque ce dernier, pour une cause ou une autre, vient effleurer le sol, l'eau s'échappe à l'extérieur.

Sur la figure infra, si nous suivons le plan des affleurements de la couche perméable sur le terrain, il existera un lieu de sources dont la plus considérable se trouvera à



l'intersection de la ligne de talweg de la vallée et de la surface de terrain qui soutient l'eau.

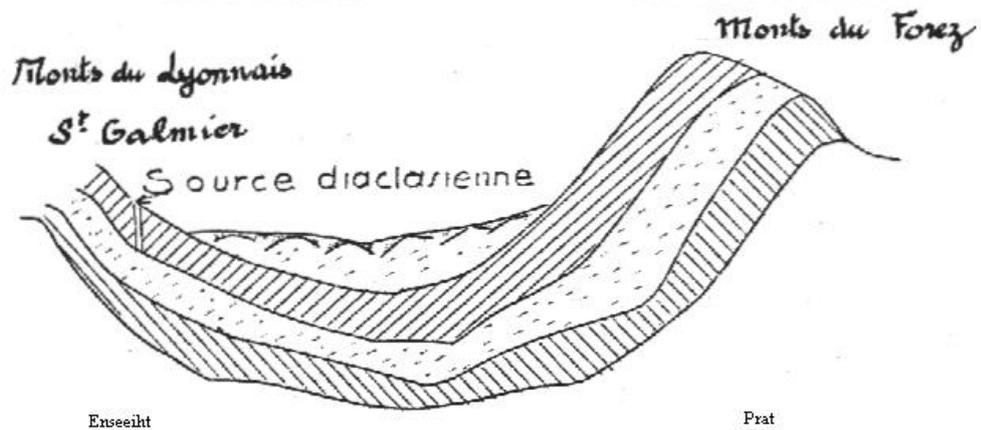
#### 21.2 Source diaclasienne

En ce cas, elles s'écoulent de **cassures**, sous la pression hydrostatique qui confère à la nappe le caractère artésien.

La plupart des sources thermo-minérales sont rangées dans ce type. Par exemple la " Badoit " provient de la source de Font caude ( source chaude en franco-provençal) à Saint Galmier, bien que la source soit située dans les monts du Lyonnais, l'eau provient des monts du Forez.

cf. schéma infra.

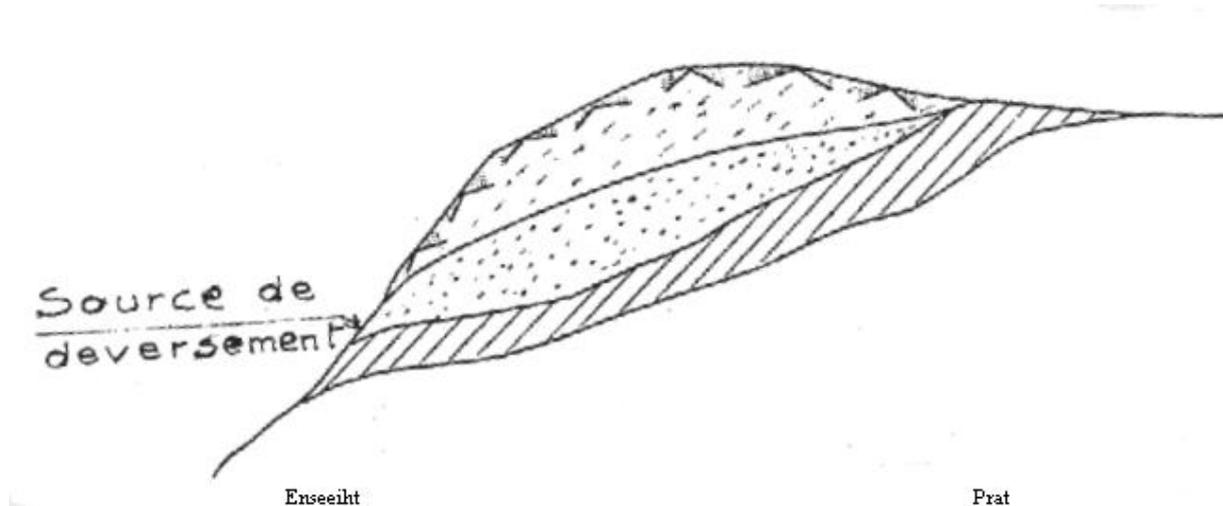
<sup>95</sup> Les Latins utilisaient le mot *fons* *fontis* qui donnera fontaine lequel mot peut aussi désigner une source



Il faut noter que la source Badoit conserve un débit constant et que la société exploitante ne peut mettre sur le marché que le nombre de cols (de bouteille) correspondant à son débit. D'où l'usage de la bouteille de... 33 cl en plus de celles 50 cl généralement répandues, ce qui lui permet de conserver un nombre valable de cols

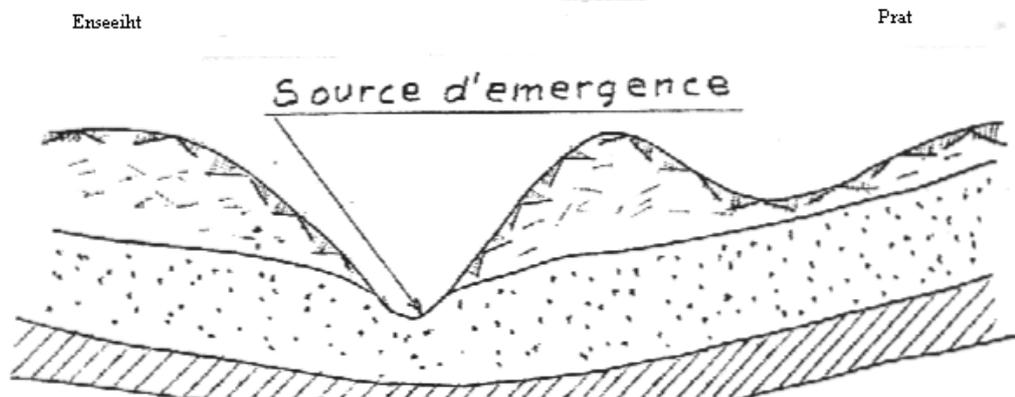
### 21. 3 Source de déversement

Lorsque la couche imperméable vient recouper la surface du sol ce qui arrive souvent à flanc de coteau cf. schéma infra



### 21. 4 Source d'émergence ou de talweg

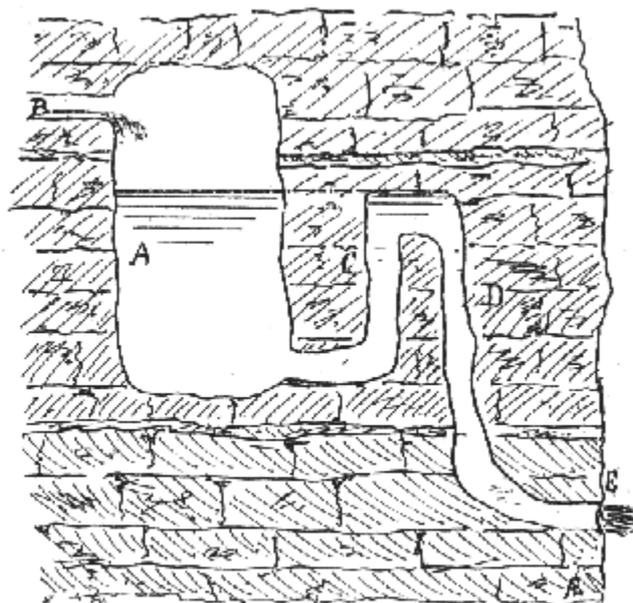
Si la couche imperméable reste sensiblement parallèle à la surface du sol si celle-ci présente une brusque dépression, l'eau sourdra dans le fond ainsi créé. Cf. schéma infra



## 21. 5 Source intermittente

Indépendamment des saisons, il existe des sources qui coulent à certains moments puis cessent de couler à d'autres ; reparaissent puis disparaissent ; elles sont qualifiées de sources intermittentes.

De tout temps elles constituèrent une source d'étonnement et de curiosité. Le principe de ces fontaines repose sur celui du **siphon** cf. schéma *infra*



Principe des sources intermittentes.

A creux où s'amassent les eaux souterraines.  
B conduit d'arrivée des eaux.  
C.D siphon.  
E écoulement vers l'extérieur.

Art des sources

Auscher

Pour que la source soit intermittente il faut que le siphon CD entraîne plus d'eau que n'en reçoit le creux A sans quoi l'écoulement resterait constant.

Parmi les fontaines intermittentes bien connues citons :

la fontaine de Jaude à Clermont-Ferrand, la fontaine de Bellerive sur Allier ( Vichy), la fontaine de Touillon (Pontarlier)

## 22 Résurgence

La nature s'est quelquefois chargée de donner à l'homme des eaux qui ont été réunies et groupées par un travail souterrain, nous citerons quelques exemples:

### 22.1 La Fontaine de Vaucluse

Elle jaillit en bas d'un rocher à pic de 200 mètres de haut fermant un étroit vallon<sup>96</sup>, son bassin communique avec une énorme caverne, son débit atteint ... 120 m<sup>3</sup> / seconde ; elle constitue le point bas d'un réseau drainant la pluie tombée sur la région du mont Ventoux.

### 22.2 Les sources de l'Avre

En 1887 un pharmacien d'Evreux jeta de la fluorescéine dans le cours superficiel de l'Avre, cela entraîna la coloration des sources à ... 14 km en aval dans une vallée séparée de celle de l'Avre par deux plateaux et une vallée intermédiaire.

Par circuit souterrain les eaux de l'Avre resurgissaient donc dans une autre vallée.

<sup>96</sup> val cluso en langue d'oc, d'où vaucluse

## 23 Pertes

Il peut même arriver que des cours d'eaux disparaissent sous terre et réapparaissent plus loin empruntant pour une longueur de plusieurs kilomètres un trajet souterrain souvent resté mystérieux. Ainsi la Valserine, tributaire du haut-Rhône, disparaît avant que de réapparaître à Bellegarde peu avant le point de confluence. De même à Cornus sur le plateau du Larzac, la rivière la Combe disparaît au lieu dit Caussanuéljouis.

### 23. 1 Catavothrès d'Argostoli

Dans l'île de Céphalonie, à 2 heures de bateau de la Grèce en direction de l'Italie, il existe au bord du fjord d'Argostoli, la capitale, des cuvettes peu profondes situées à quelques mètres de la mer, appelées catavothrès, et qui reçoivent l'eau de celle-ci.

Cf. carte ci-contre

Cette eau de mer ressort sous forme d'eau douce ou saumâtre à 23 km à l'est près de Sami après avoir baigné le gouffre de Mélissane où l'eau de la rivière souterraine montre une profondeur de ... 40 m.

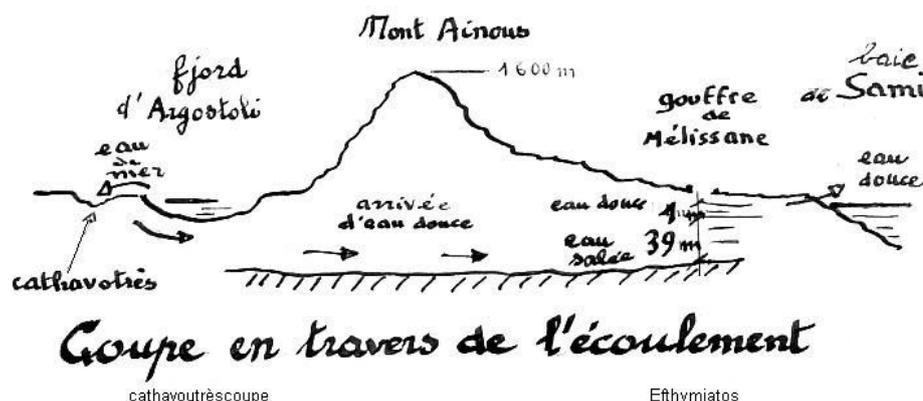
Cf. photographie infra



L'eau de mer infiltrée dans les catavothrès d'Argostoli se glisse sous le mont Ainous en se mélangeant avec de l'eau douce, chargée de sels elle se tient en – dessous de cette dernière et dans le gouffre de Mélissane l'on mesure 39 m d'eau salée et au-dessus 1 m d'eau douce cette dernière avance par cette pente motrice et se déverse en mer via un étang, qui communique avec celle-ci sur la plage de Sami.

Cf. . la coupe *infra* d'ouest en est entre Argostoli (entrée) et Sami (exutoire)

Le parcours de 23 km s'effectue en 14 jours soit avec une vitesse de ..... 68 mètres à l'heure



## 3 Bilan hydrologique

### 31 Coup d'œil sur la répartition des eaux

Nous pouvons concevoir la répartition des eaux mondiales selon différents points de vue:

- une répartition quantitative et qualitative des eaux à l'échelle du globe et par rapport aux différentes composantes du cycle hydrologique,
- une répartition spatiale du bilan de l'eau sur les continents ou à l'échelle d'une zone géographique.

### 32 A l'échelle du globe

#### 32.1 Répartition spatiale

Nous remarquons que la superficie des terres émergées de l'hémisphère **boréale** dépasse de **deux fois** celle de l'hémisphère **austral**, de plus il n'existe pas d'homogénéité dans la distribution spatiale des aires continentales et océaniques à la surface du globe.

Les eaux douces, 3 % des eaux du globe, se retrouvent à 99 % dans les calottes polaires, les glaciers et les eaux souterraines, cf. tableau infra.

Réservoir	fraction des réserves totales
eaux océaniques	96, 59 %
glaciers, calottes glaciaire	1, 73 %
eaux souterraines	1, 68 %

#### 32.2 Les eaux souterraines

Les eaux souterraines occupent le second rang des réserves mondiales en eau douce après les eaux contenues dans les glaciers. Leur apport s'avère d'autant plus important que dans beaucoup d'endroits les populations s'alimentent en eau potable **presque exclusivement** en eau souterraine par l'intermédiaire de **puits**.

Mais leur exploitation abusive entraîne parfois un abaissement irréversible des nappes phréatiques et leur remplacement graduel par l'eau saumâtre (Lybie, Egypte...).

#### 32.3 Les eaux continentales de surface

A l'inverse des eaux souterraines, elles demeurent accessibles, mais elles peuvent être facilement polluées.

Le **Canada** possède à lui seul ..... 30 % des réserves mondiales en eau douce.

N.B : les eaux météoriques quoique fort modestes jouent un rôle essentiel dans le cycle.

#### 32. 4 Temps de renouvellement

Dans chacun des grands réservoirs terrestres, l'eau se renouvelle au fil du ... temps. L'on calcule ce temps de renouvellement (ou de séjour) en divisant la taille du réservoir par le flux (débit) d'entrée ou de sortie.

Réservoir	Temps de renouvellement ( selon Gleick en ' 83)
océan	3100 ans
calotte glaciaire	16 000 ans
eaux souterraines	1 500 à 300 ans
eau du sol	280 jours
lac salé	10 à 100 ans
lac d'eau douce	1 à 100 ans
cours d'eau	12 à 20 jours
eau atmosphérique	9 jours

### 32. 5 Caractéristiques des cycles océanique et continental

#### 325.1 Bilan

A l'échelle du globe le bilan est **nul**, car des échanges d'environ 40 000 km<sup>3</sup>/ an équilibrent le cycle.

#### 325. 2 Impact géographique

- Les trois processus principaux, à savoir : les précipitations, l'évaporation, et le renouvellement **décroissent** de l'équateur vers les pôles. Sur un même parallèle l'intensité de l'évaporation sur les continents reste **uniforme** ( $d\omega = \frac{dS}{D^2} \sin h$ )

-h :hauteur du soleil sur l'horizon et D : distance terre- soleil  
 La quantité de précipitations en un point reste **inversement** proportionnelle à sa distance de l'océan.

### 33 A l'échelle d'une zone

#### 33.1 Cas de la Suisse

Les chiffres fournis par le service hydrologique suisse pour l'année ' 85 donnent le tableau infra

critères	hauteur d'eau en mm/an
précipitations	1456
ruissellement	978
stockage	- 6
évaporation	484
Précipitations = ruissellement +évaporation ± stockage	Flux entrant = flux sortant (loi de Lavoisier)

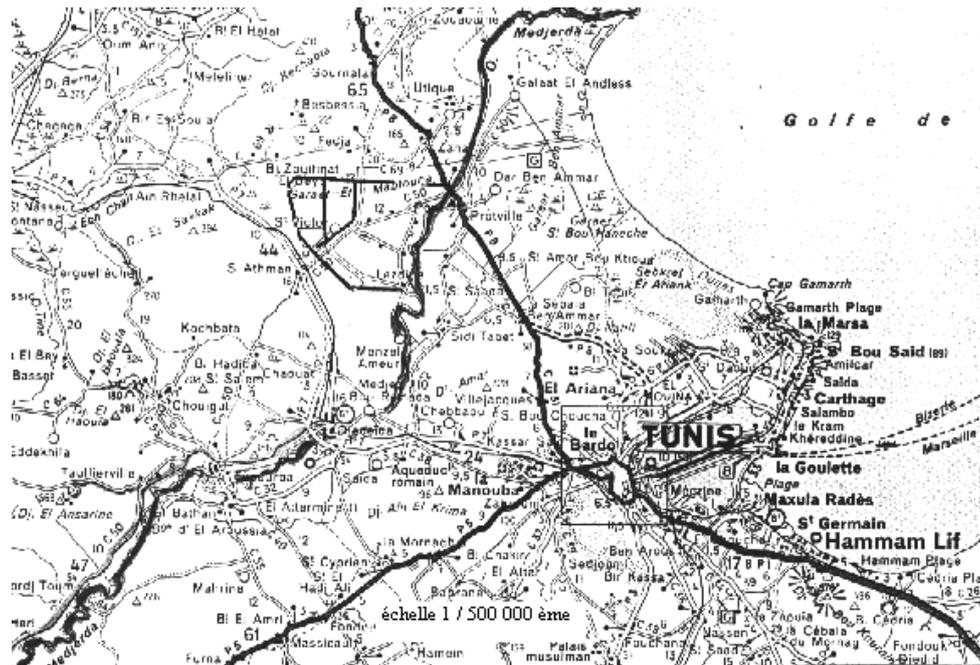
Ce bilan est caractérisé par l'interdépendance de ses composantes , par sa stabilité et son équilibre dynamique.

Que ce processus vienne à être perturbé et tous les autres s'en ressentent: cycle de l'azote, cycle du phosphore ...

#### 33. 2 Cas d'une parcelle tunisienne

##### 332. 1 Données géographiques et hydrologiques

Le périmètre Habibia de 1 000 hectares est situé dans la basse vallée de la Medjerda en Tunisie



cf. carte infra

Il comprend :

- un réseau d'irrigation gravitaire,
- un réseau de drainage en poterie enterrée,
- un réseau d'assainissement par fossé,
- un réseau de 75 piézomètres,

La pluviométrie mesurée à la station de Cherfech se monte à .... 450 mm/an avec un été sec ( étage bioclimatique semi-aride)

### 332. 2 Critères de calcul

Sur 34 ans de mesures piézométriques il a été possible de déterminer la **lame d'eau** moyenne qui alimente l'horizon aquifère d'Habibia : soit ..... 100 mm/an ; soit ..... 21 % de la pluviosité moyenne annuelle ( 473 mm).

### 332. 3 Résultat

Entrées		Sorties	
critères	intensité	critères	débit fictif continu
recharge efficace dans l'horizon aquifère	100 mm/an	vidange de la nappe par drainage	0,75 l/sec/ ha
alimentation par irrigation	425 mm/an	prélèvements par puits	1 l/sec/ha

$$\Sigma \text{ débits entrant} - \Sigma \text{ débits sortant} = 0,08 \text{ l/sec/ha}$$

**N.B. :** Une pluie de .... 1 mm sur un hectare représente ..... 10 m<sup>3</sup>

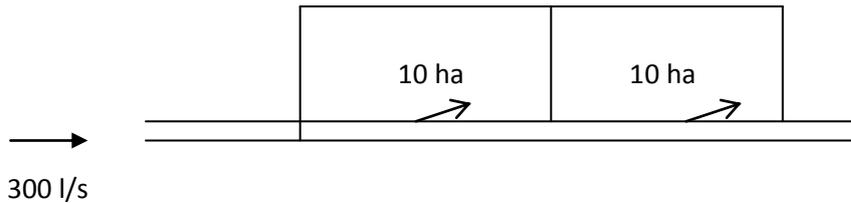
Un débit de..... 1 l/seconde sur un an représente .....31 622 m<sup>3</sup>

La notion de " débit fictif continu " remonte à la période où tout s'effectuait par irrigation gravitaire, l'aspersion restant inconnue. Il fallait donc partager la " main d'eau " entre tous selon un horaire défini.

Ainsi il fallait 1 l/sec/ha pour arroser des prairies du 1er avril au 30 septembre contre 4 l/sec/ha pour le riz ; ceci dans le sud de la France avec un sol perméable.

• Exemple :  
Supposons que l'on dispose d'un canal transportant... 300 l/sec et que le débit fictif continu soit de 30 l/sec/ha.

Admettons que la perméabilité du sol soit telle que le débit réel atteigne 30 l/sec/ha. On ne pourra arroser que 300 donc 10 hectares à la fois et il faudra répartir le terrain en lots de 10 ha que l'on arrosera  
30  
cf. croquis infra



Dans l'arrosage par aspersion, le débit réel à l'hectare pendant l'aspersion devient très supérieur au débit fictif continu; près de Milan, les irrigants utilisent 150 litres/sec/ha.

## Circulation de l'eau dans l'unité d'intervention

### 1 Bilan hydrique d'un sol

#### 11. Définition

#### 12 Théorie

#### 13 Critères

#### 14 Mesures

### 2 Continuum climat -sol-plante

#### 21 Potentiel hydrique

#### 22 Voies de la circulation de l'eau dans la plante

#### 23 Résistance à la circulation de l'eau

#### 24 Loi de Darcy généralisée

### **3 Stockage tellurique et cession aux plantes**

**31 Teneur en humidité profil hydrique**

**32 Humidité critères**

**33 Niveau énergétique de l'eau dans le sol**

**34 Facteurs agronomiques influençant la réserve en eau**

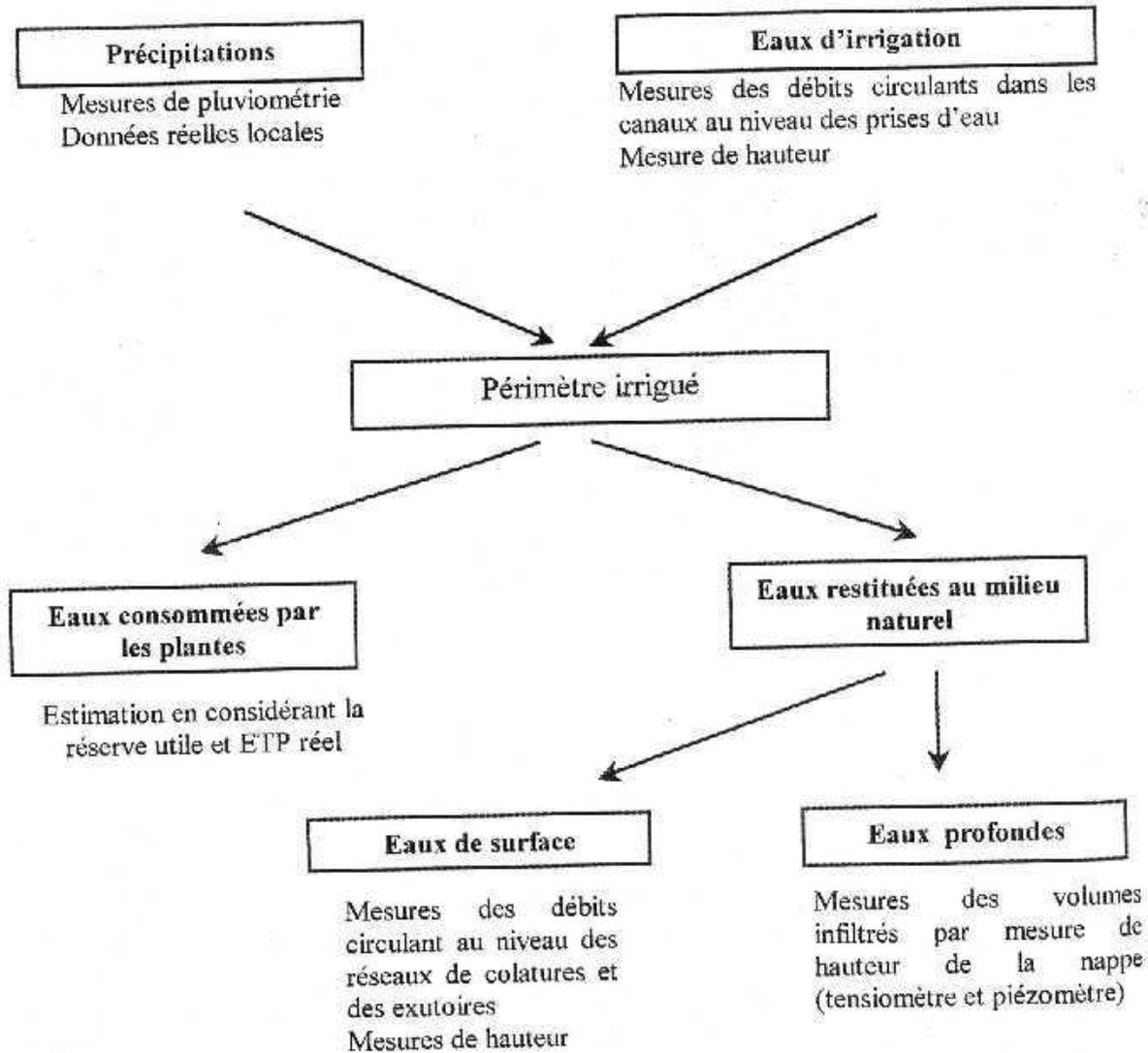
## **1 Bilan Hydrique d'un sol**

### **11 Définition**

L'on peut schématiser le bilan hydrique d'un sol correspondant à une surface irriguée ainsi :

- précipitation et irrigation éventuelle
- eau consommée par les plantes,
- évaporation et restitution de l'eau au milieu naturel ;

Ces données sont transcrites sur le schéma infra



Fonctionnalités alternatives des réseaux d'irrigation gravitaire

Ensam

L'estimation des quantités d'eau circulant dans ces trois étapes s'effectue par une **équation** représentant le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace et le temps.

Le **temporel** introduit la notion de période où s'effectue le bilan, laquelle peut être courte ou longue

L'usage conduit **spatialement** à travailler à l'échelle du bassin-versant ; mais l'on peut raisonner à un autre niveau par exemple sur un périmètre irrigué, cf. supra

## 12 Théorie

### 12.1 Loi de la continuité ( ou de Lavoisier)

L'équation du bilan hydrique peut s'exprimer comme suit pour une période et un bassin donné:

$$P + S = R + e + (S + \Delta S)$$

avec P : précipitations en mm (liquide et solide)

S : ressources en mm ( accumulation de la période précédente : eau souterraine, humidité du sol)

R : ruissellement en surface et écoulement souterrain en mm

e : évaporation en mm ( y compris évapotranspiration)

S + ΔS : ressources accumulées à la fin de la période

On peut également écrire que la différence entre le débit entrant et le débit sortant est égale à la **variation du** volume d'eau emmagasinée au cours de la période considérée :

$$e = Q_E - Q_s + \Delta S$$

avec e : évaporation en mm

Q E : débit entrant en mm

Q s : débit sortant en mm

ΔS : variation du stockage en mm ( positive ou négative )

### 12.2 Déficit d'écoulement

Si le bassin-versant montre *une imperméabilité forte, l'infiltration = 0*

et la variation sur une période donnée peut être considérée comme nulle, ΔS = 0

dès lors l'on peut introduire la notion de " déficit d'écoulement " :

$$\text{Déficit} = Q_E - Q_s$$

lequel représente essentiellement les pertes dues à l'évaporation, calculables selon les formules de Turc<sup>97</sup> ou de Coutagne, citées dans le cours d'Hydrologie.

## 13 Critères

### 13. 1 Précipitations

#### 131. 1 Intensité

On parle d'intensité de pluie pour caractériser la quantité d'eau qui tombe dans un temps déterminé.

Sa valeur est donnée par la formule  $i = a t^n$  ( Montana )

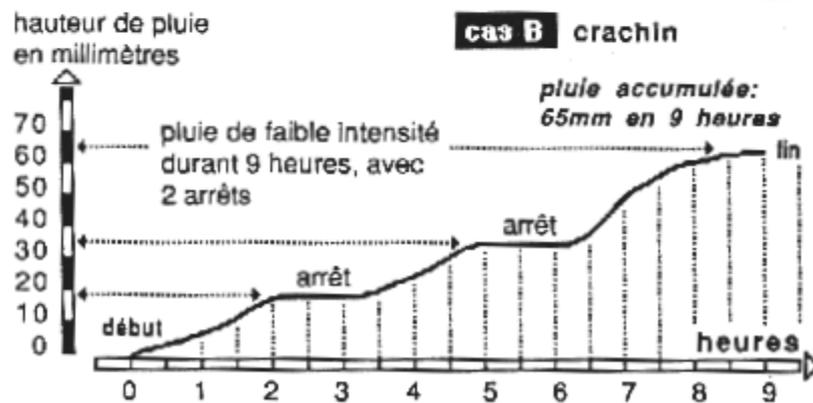
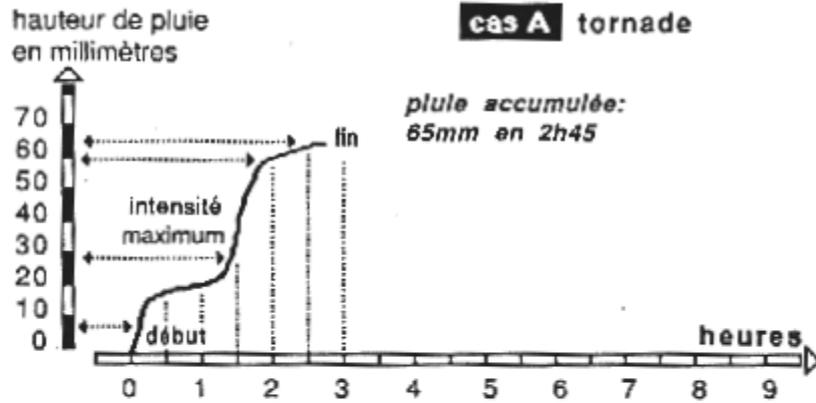
Dans le graphique infra l'on note que pour une même quantité de pluie tombée l'intensité apparaît comme fort différente.

---

<sup>97</sup> Déficit =  $\frac{P}{(0,9 + P^2 / L^2)^{0,5}}$

P : pluie annuelle T : température moyenne  $L = 300 + 25T + 0,05 T^3$

pour mesurer l'intensité d'une pluie journalière, on relève toutes les heures ou les demi-heures la quantité d'eau accumulée dans le pluviomètre. On note la mesure sur un graphique.



Les pluies de faible intensité s'avèrent les plus intéressantes pour l'infiltration dans le sol.

### 131. 2 Variabilité spatio-temporelle

Sur un bassin-versant, la pluie ne tombe pas avec la même intensité en tous points, il peut même exister en cas d'orage des points où il ne pleut pas.

Si l'unité d'intervention présente une certaine étendue, il faudra placer plusieurs pluviographes et établir une **corrélation** entre eux.

### 131. 3 Probabilité d'apparition et période de retour

L'analyse fréquentielle constitue une méthode **statistique de prédiction**, consistant à étudier les événements passés caractéristiques d'un processus donné, par exemple : précipitations atmosphériques afin d'en définir la **probabilité d'apparition** future. :

$$\frac{\text{nombre de cas où l'événement s'est produit}}{\text{nombre de cas où l'événement aurait pu se produire}}$$

La période de retour étant par définition l'**inverse de la probabilité**, si cette dernière est de 1 fois sur 10 ans donc de 0,1, la période de retour devient  $1/0,1 = 10$  ans

En hydrologie, dire qu'une intensité de pluie est de fréquence ou probabilité **décennale** OU que ladite intensité a une **période de retour** de 10 ans signifie que " chaque année il existe **1 chance sur 10** pour qu'une précipitation de cette intensité se produise ".

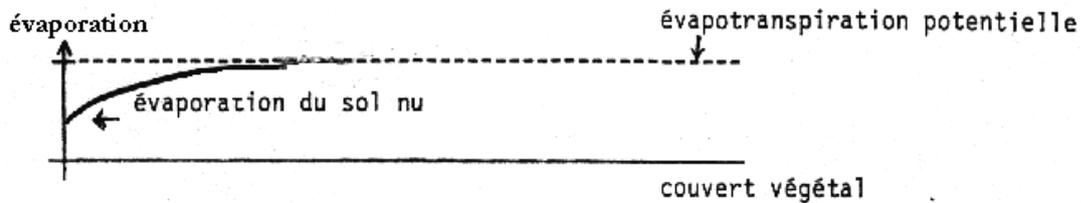
### 13. 2 Evapotranspiration

L'**évaporation** de la surface du sol est un phénomène **physique** purement passif dont l'importance dépend de :

l'insolation, la température de l'air et du sol, des vents, des caractéristiques du sol.

La **transpiration** au contraire correspond à un phénomène **biologique** actif fonction de la couverture végétale

cf. courbe infra



#### Courbe de l'évapotranspiration

évaporation à la surface du sol + transpiration des plantes = évapotranspiration de la parcelle

Sa valeur est donnée par la formule  $ET_p = \frac{0,40 t}{t + 15} (I_g + 50)$  (Turc)

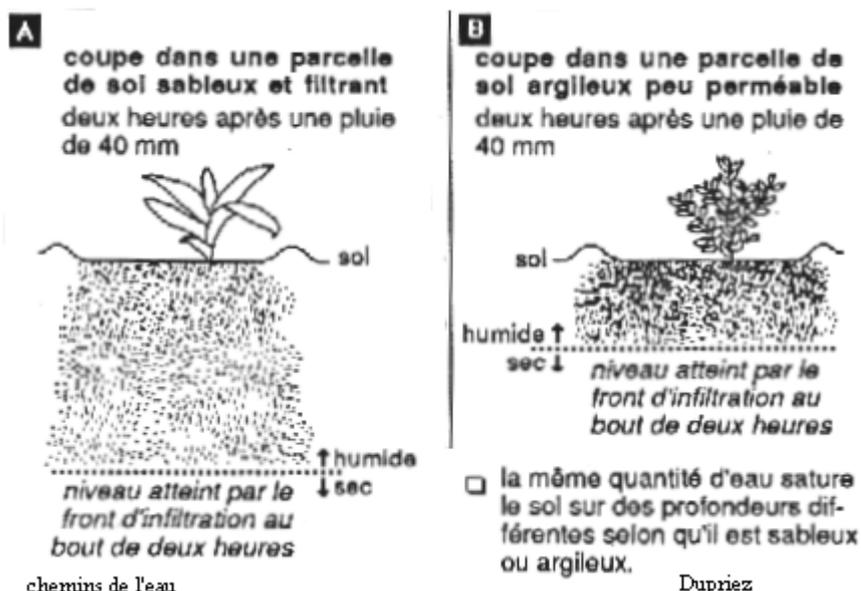
$I_g$  : radiation en cal par  $cm^2$ / jour

### 13. 3 Infiltrabilité

L'eau descend dans le sol et le sous-sol du fait de son poids, ces mouvements peuvent être désignés aussi par les mots : percolation, ressuyage, infiltration.

#### 133. 1 Infiltration gravitaire et front d'infiltration

L'on appelle front d'infiltration la limite inférieure de la couche d'eau s'infiltrant dans le sol.



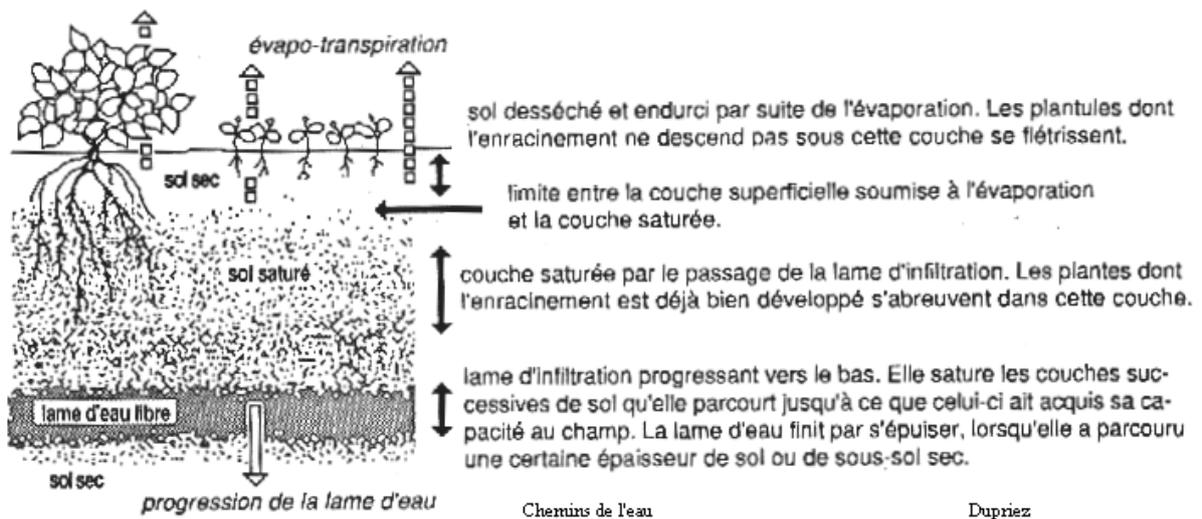
chemins de l'eau

Dupriez

La figure ci-contre montre la progression du front d'infiltration. Elle s'avérera plus rapide dans un sol sableux que dans un sol argileux

### 133. 2 Front d'infiltration et évaporation

Après une pluie, l'eau s'infiltré, mais l'évaporation se poursuit à la surface du sol et la couche superficielle s'assèche. cf. croquis *infra*



### 13. 4 Drainage

#### 134. 1 Drainage naturel

Les eaux **en excès** dans un sol peuvent provenir de deux origines distinctes: la pluie OU la nappe phréatique.

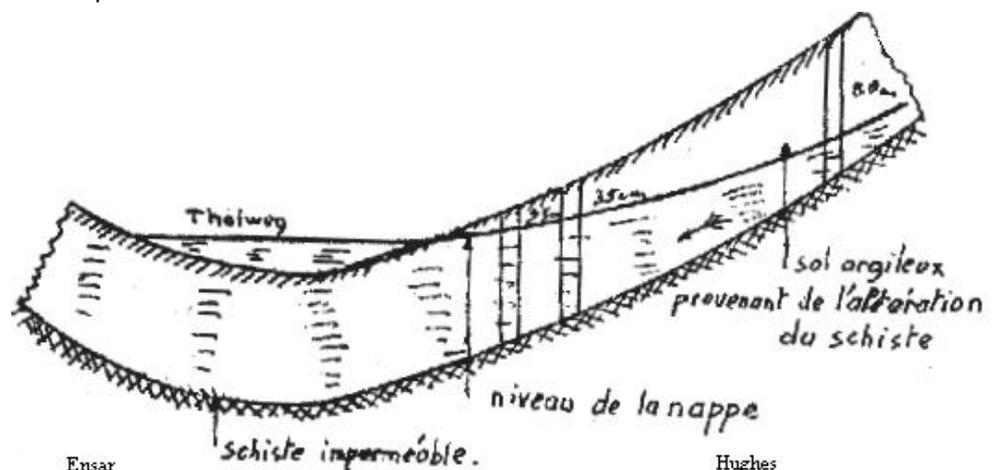
Si l'eau s'accumule dans un bas-fond sur un sol imperméable du fait du peu d'évaporation, cela entraîne la création d'un marécage. Ce type de sol se trouve mal drainé chroniquement.

Dans d'autres cas, souvent au voisinage d'un cours d'eau, c'est la nappe phréatique qui atteint et dépasse la surface du sol d'où inondation (cf. les riverains de la Somme en '01). Le sol se trouvera mal drainé temporairement.

. cf.

Schéma

ci-contre



### 134. 2 Drainage artificiel

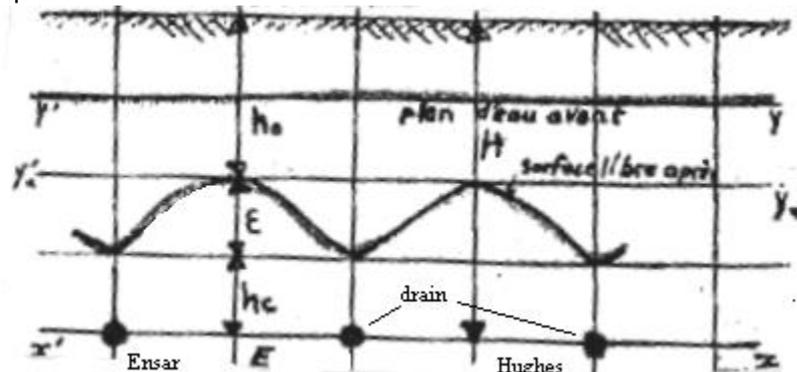
Il s'agit de l'opération d'assainissement réalisée à l'aide de conduites souterraines non jointives convenablement disposées dans le sol.

Cette méthode vit le jour en Angleterre vers 1805.

Hervé Mangan en 1850 rédigea des " Instructions pratiques sur le drainage ".

Après pose des conduites en poterie à la profondeur  $H$  la surface libre de l'eau s'abaisse et se déforme.

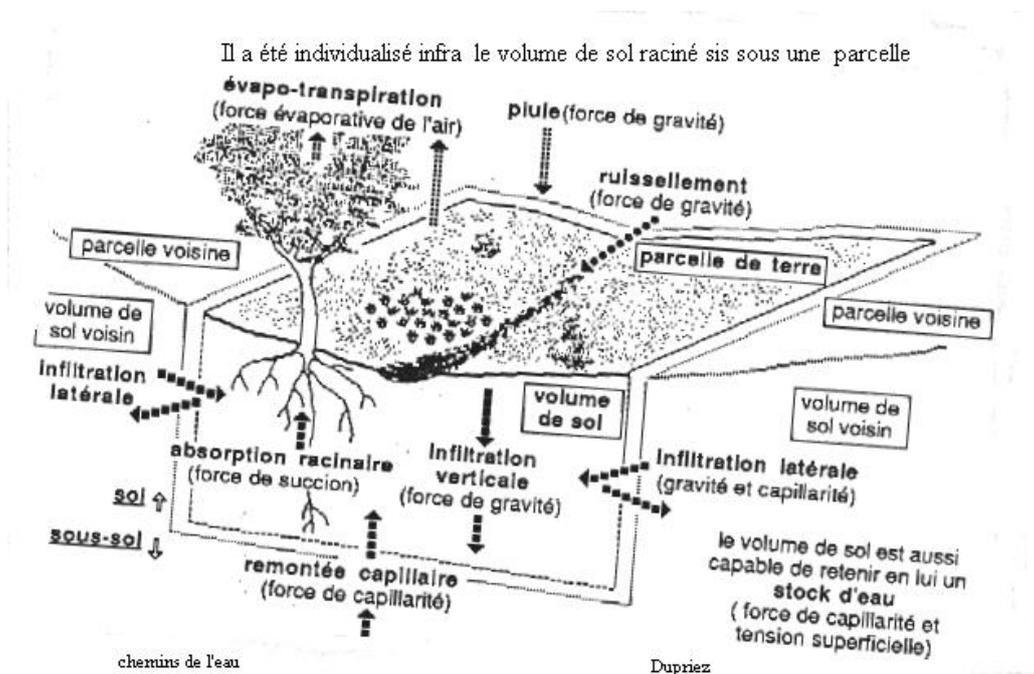
cf. graphique infra



### 13. 5 Circulation transversale

La figure infra représente un morceau de paysage en plan et en coupe, elle montre : un ruisseau, un arbre, quelques buissons et des plantes cultivées.

Sous la surface, il a été isolé le volume de sol raciné intéressant directement l'agriculture.

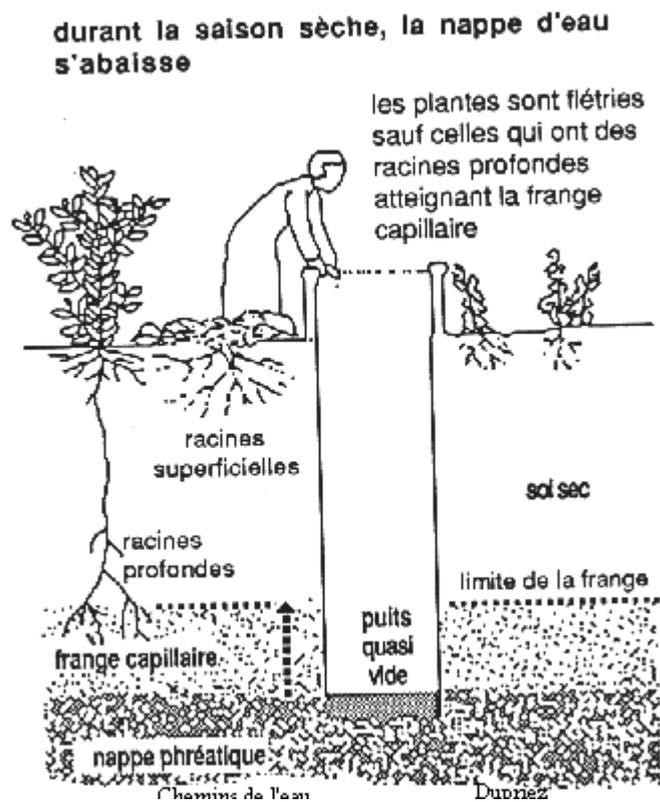


Parmi les mouvements de l'eau on doit constater que les mouvements latéraux jouent un rôle important

### 13.6 Transfert hors de portée des racines

En période sèche les plantes sans racines profondes se flétrissent

cf. croquis ci-contre



### 13.7 Ascension capillaire <sup>98</sup>

#### 137. 1 Description de la force de capillarité et de la tension superficielle

Elles sont liées à l'attraction de l'eau par les surfaces.

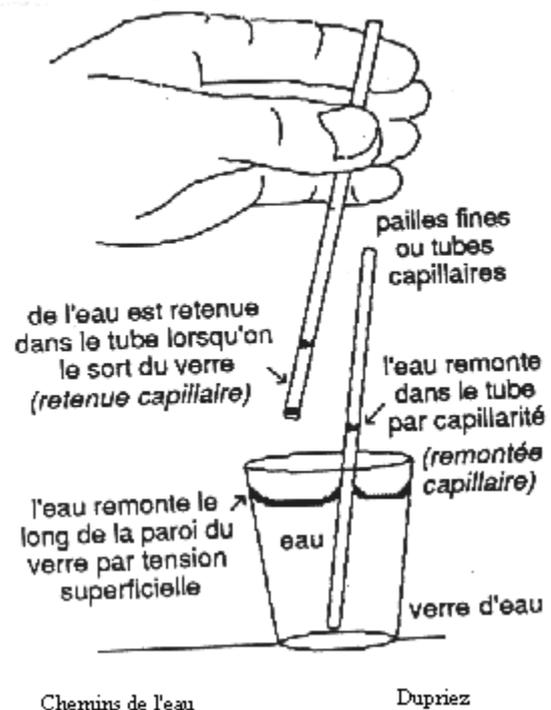
• d'où ASPIRATION

L'eau remonte le long de la paroi de verre par tension superficielle, l'eau remonte dans le tube par capillarité

• ou RETENUE

l'eau est retenue dans le tube lorsqu'on la sort du verre (retenue capillaire)

cf. schéma ci-contre



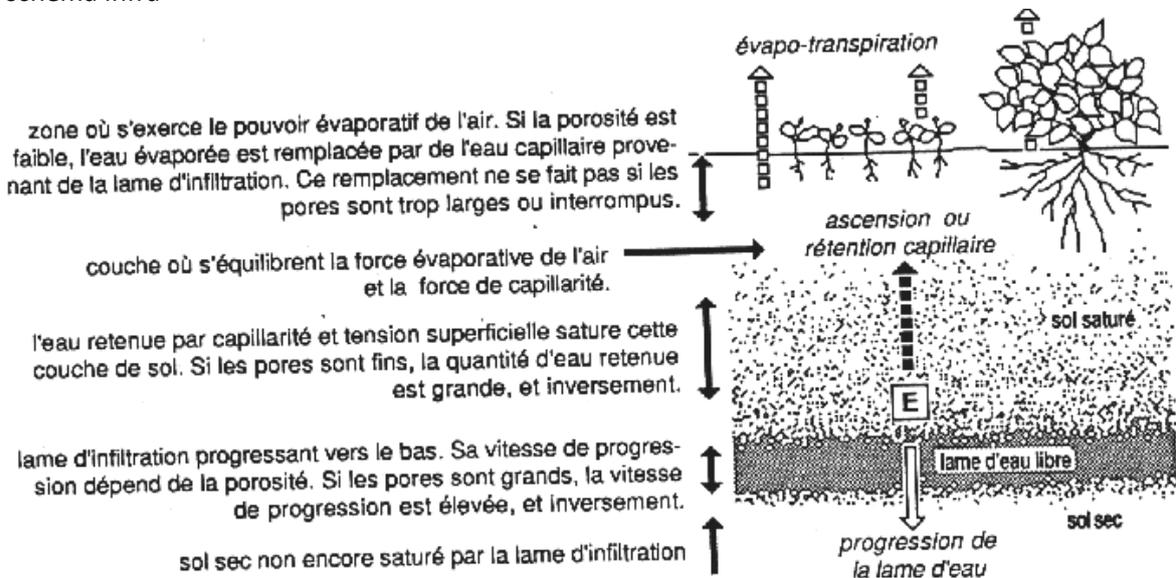
<sup>98</sup> Du latin capillus, i : le cheveu

### 137. 2 Application dans le sol

Dans le sol, après passage de la lame d'infiltration au point E, l'eau se trouve soumise à plusieurs champs de forces :

- vers le bas : poursuite de la percolation **gravitaire** (champ de force dérivant du potentiel de gravité)
- sur les grains du sol : action de la rétention **capillaire** (champ de force dérivant du potentiel capillaire)

Ces deux potentiels constituant le potentiel hydraulique ou **charge hydraulique**.  
 cf. schéma infra



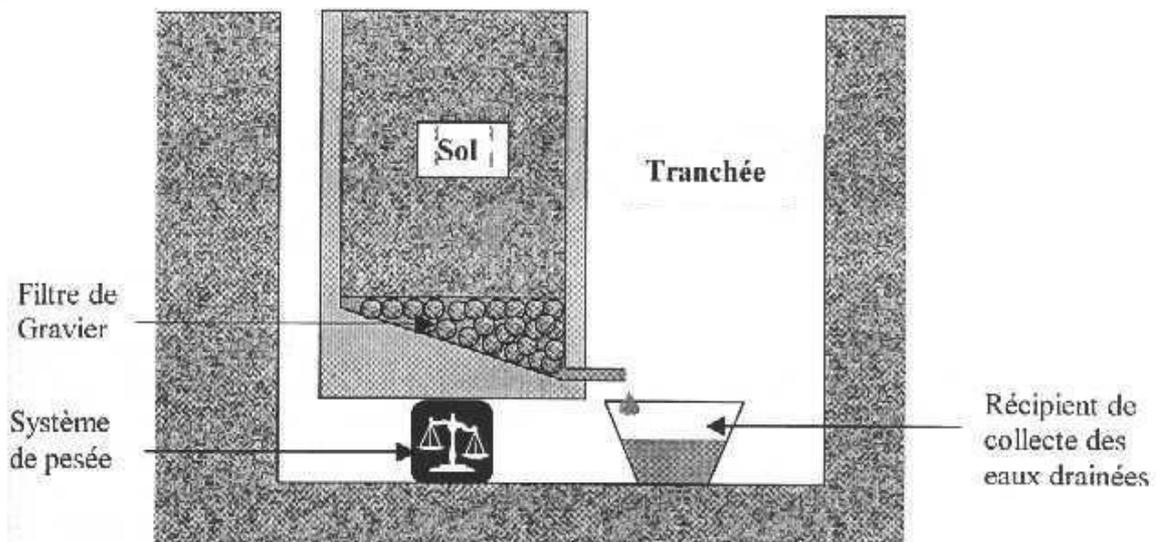
Chemins de l'eau

Dupriez

## 14 Mesures

### 14.1 Evapotranspiration

On emploie la case lysimétrique où, à l'air libre, un mois donné, l'on observe une culture.  
 cf. schéma infra



Une case lysimétrique

Fonctionnalités alternatives des réseaux d'irrigation gravitaire

Ensam

Soit  $Q_1$  la quantité d'eau dans le sol de la case le ..... 1<sup>er</sup> mai

Soit  $Q_2$  la quantité d'eau dans le sol de la case le ..... 31 mai

supposons  $Q_1 < Q_2$

Reprenons l'équation du bilan hydrique : flux entrant = flux sortant (Loi de Lavoisier)

$$Q_1 + Q_H = Q_2 + Q_p + \text{évapotranspiration}$$

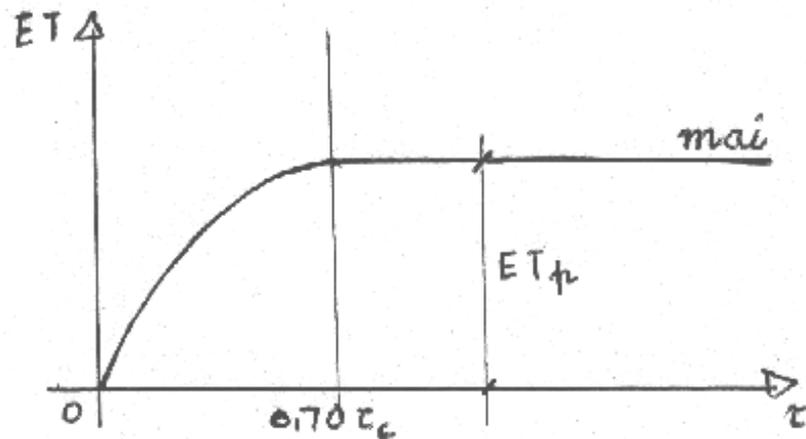
Soit  $Q_H$  la quantité d'eau de pluie tombant entre le 1<sup>er</sup> et le 31 mai

Soit  $Q_p$  la quantité d'eau recueillie par percolation ( drainage)

Il vient :  $ET = Q_1 + Q_H - (Q_p + Q_2)$

Si l'on porte en ordonnée, l'évapotranspiration, et en abscisse, la teneur d'humidité moyenne du sol  $\tau$

l'on obtient la courbe ci-contre



L'évapotranspiration s'accroît puis atteint un palier :  $ET_p$  ou *évapotranspiration potentielle*, correspondant à une couverture végétative totale du sol, ce dernier se trouvant bien pourvu en eau.

#### 14. 2 Eau de pluie

On utilise un pluviomètre, cf. cours d'hydrologie, qui indiquera la quantité tombée sur une période donnée.

#### 14. 3 Teneur en eau du sol

Un échantillon du sol sera mis dans une étuve à 105 ° jusqu'à poids constant, l'eau recueillie fournira la contenance en eau dudit sol.

#### 14. 4 Potentiel capillaire ou tension de l'eau du sol

Le tensiomètre est un appareil mesurant sur place la pression ou la tension de l'eau du sol donc l'énergie à fournir pour l'extraire). Il est constitué d'une tasse poreuse perméable en céramique reliée par un tube à un manomètre ou jauge à vide ; voir description infra p. 67

Plus les pores des matériaux du sol sont fins et plus le potentiel capillaire est élevé, donc plus l'eau est retenue.

#### 14.5 Résultat

Il peut être représenté sous la forme du tableau *infra*

mois	$Q_H$	ET	$Q_1$ début de mois	$Q_H - ET$	$Q_p$	$Q_2$ fin de mois
janvier	125 mm	0	50 mm	125 mm	12 mm	163 mm
juin	97 mm	120 mm	40 mm	- 21 mm	7mm	10 mm

L'été, par le jeu de l'évapotranspiration et de la baisse de la pluviométrie  $Q_2$  devient inférieur à  $Q_1$

## 2 Continuum<sup>99</sup> climat-sol-plante

### 21 Potentiel hydrique

#### 21.1 Méthodes de mesure

##### 211.1 Pluviométrie

- Relevés quotidiens

hauteur des pluies journalières en mm

dates	hauteur des pluies journalières en mm
1	32
2	10
3	0
4	29
5	9
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	4
13	18
14	9
15	14
16	0
17	3
18	4
19	0
20	0
21	0
22	2
23	0
24	0
25	3
26	15
27	0
28	4
29	4
30	11
31	60

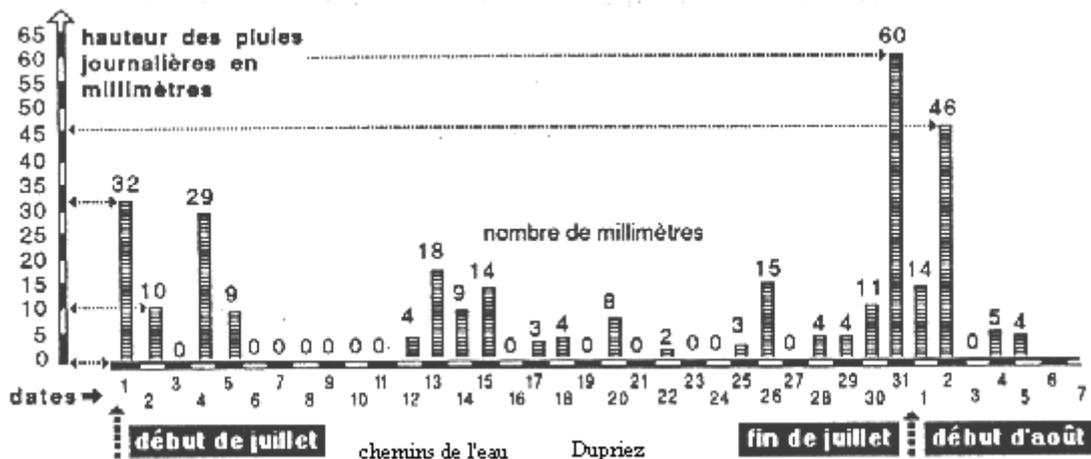
Chaque jour de préférence à la même heure on mesure la quantité d'eau enregistrées au pluviomètre et on l'enregistre sur un relevé du type de celui ci-contre.

Une fois ces chiffres recueillis l'on peut SOIT les totaliser par période SOIT établir des moyennes voire même les représenter sous forme graphique

chemins de l'eau Dupriez

- Histogramme des pluies

L'histogramme infra représente l'image graphique du relevé supra. L'axe vertical indique la quantité d'eau tombée au cours de chaque journée

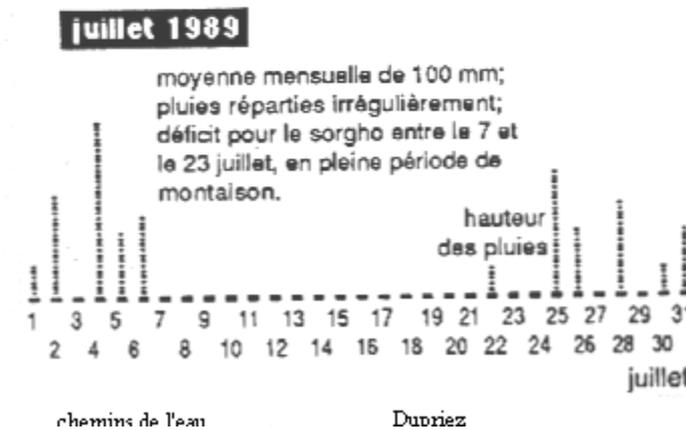
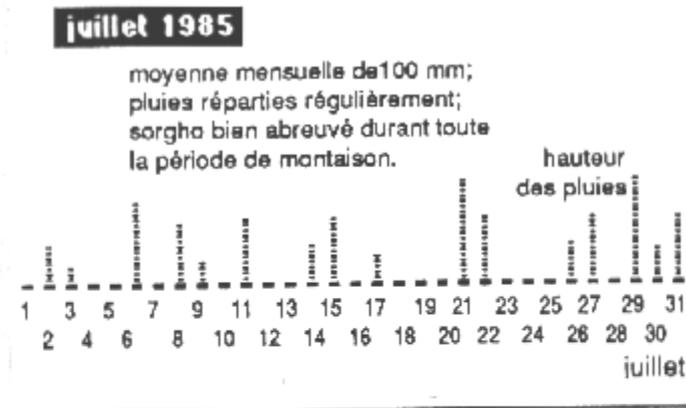


<sup>99</sup> continus, -a, -um : qui se suit sans interruption, contigu

• Moyenne des pluies et plantes:

Les plantes ne réagissent pas en fonction des moyennes de pluie mais en fonction des quantités **disponibles** au **jour le jour** dans le sol raciné.

Dans les graphiques infra la même moyenne de pluie a donné des résultats fort différents pour le sorgho



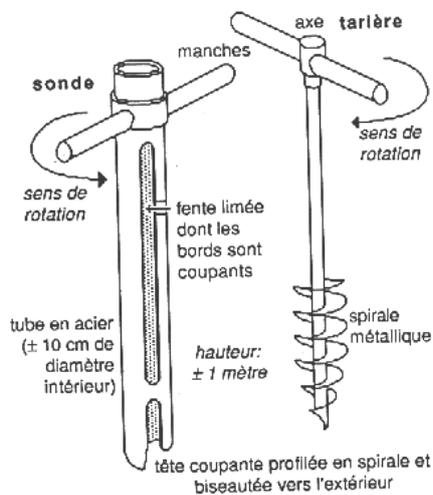
chemins de l'eau

Dunriez

**211. 2 Degré d'humidité du sol**

• Par observation du sol

A l'aide de sonde ou de tarière



chemins de l'eau

Dunriez

cf. croquis ci-contre

L'on obtient des " carottes " de sol  
cela permet d'apprécier:

- la couleur,
- la consistance,
- le contenu en eau libre

- Par observation des plantes

L'état des racines, le flétrissement méridien des feuilles, la courbure des fruits, la faiblesse des tiges.... autant de signes qui fournissent des indications importantes.

- Par observation du climat

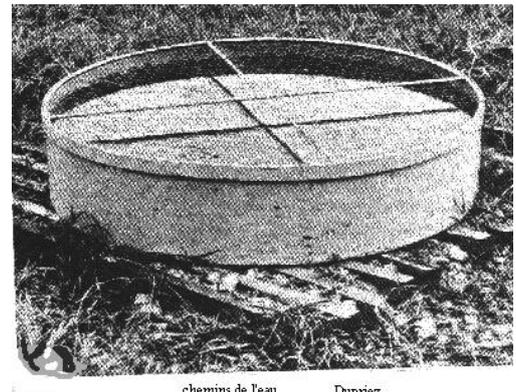
Si la période se montre chaude et venteuse, l'évaporation augmentera et le sol perdra de l'humidité.

### 211. 3 Pouvoir évaporatif de l'air

- Mesure par le bac évaporimètre

Réalisable en métal,  $\Phi$  1, 20 m, profondeur 0, 25 m, de couleur grise avec une réglette millimétrée le tout étant posé sur une plate-forme en bois à 0, 15 m au-dessus du sol.

cf. photographie ci-contre



après chaque lecture l'on ramène le plan d'eau à zéro.

### 211. 4 Evapo-transpiration

L'eau ne s'échappe pas du sol comme de la lame d'eau du bac supra.

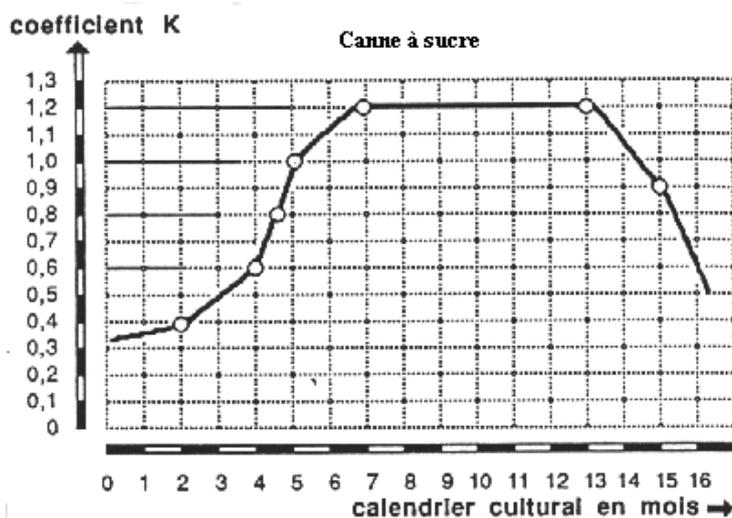
- A cause du sol

- sur sol sableux, l'évaporation s'arrête aux premiers centimètres
- sur sols argileux, l'évaporation descend plus profondément, à des dizaines de centimètres du fait de la remontée capillaire.

- A cause de la végétation

Le jeu des forces de capillarité et de succion racinaire servent pour fabriquer la bio-masse du végétal.

L'on introduit un coefficient K, correcteur du pouvoir évaporatif de l'air, et, donnant, l'évapo-transpiration.



## 21.2 Expression et unité

### 212. 1 Expression

Le potentiel hydrique met donc en jeu :  
entrée, sortie, et stock d'eau

Tout se passe comme si l'on se trouvait devant la comptabilité d'un bar dont les consommateurs s'appelleraient " plantes " et le stock de bouteilles " capacité utile du sol ".

Il faut tenir un équilibre entre le nombre de consommateurs qui se présentent chaque jour et le stock de bouteilles disponibles. Si les consommateurs viennent fort nombreux pour un stock minime ils endureront soif. Si le barman annonce au contraire l'arrivée d'un énorme stock, les consommateurs se précipiteront en grand nombre pour l'épuiser ..... quitte à souffrir de la soif plus tard.

### 212. 2 Unité

Que les bilans soient établis périodiquement ou quotidiennement, la seule unité de mesure à utiliser sera le **millimètre**.

Qu'il s'agisse de caractériser :  
la profondeur du sol, la quantité d'eau qui s'y infiltre, s'y loge sous forme de réserve ou s'en évapore directement ou indirectement.

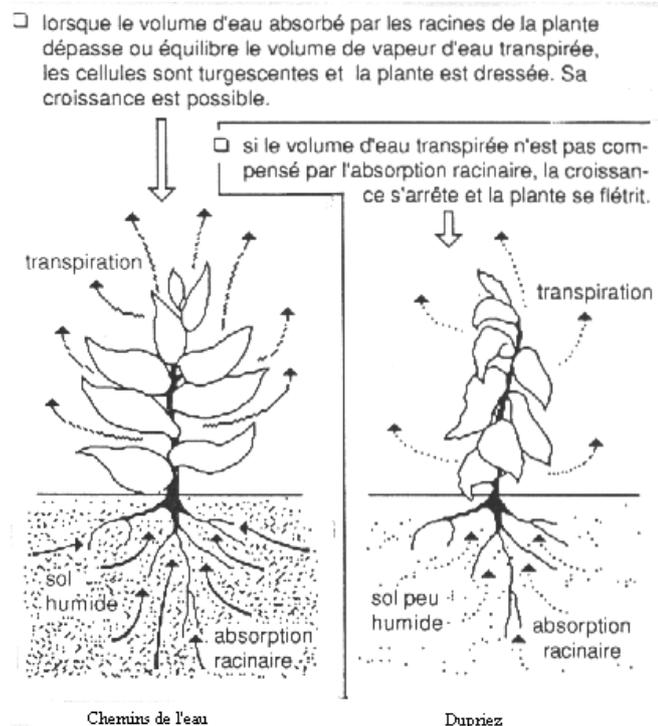
## 22 Voies de circulation de l'eau dans la plante

### 22.1 L'eau charpente

En gonflant la multitude de cellules, l'eau crée la rigidité

On appelle **turgescence** le phénomène qui gonfle les tissus des plantes et qui les rend rigides, il existe dans chaque cellule une légère pression s'exerçant à l'intérieur des parois.

cf. graphique ci-contre



Si l'eau s'échappe, la plante perd sa rigidité et l'on parle de **flétrissement**.

## 22.2 L'eau véhicule

L'eau joue le rôle de véhicule transportant les éléments nutritifs des racines jusqu'aux feuilles et depuis les feuilles aux autres organes de la plante.

Dans le sol l'eau dissout les sels minéraux utiles aux plantes, elle est alors sucée par les racines à travers les poils absorbants pour s'élever vers les tiges et les feuilles ( **sève brute** ) en transportant sa charge de matériaux.

Les feuilles la transforment alors en **sève élaborée**, contenant en plus des minéraux: du carbone, de l'azote, de l'oxygène lesquels se dirigent vers les organes demandeurs tels que fleurs, fruits, pousses foliaires et racinaires.

## 22.3 L'eau régulatrice

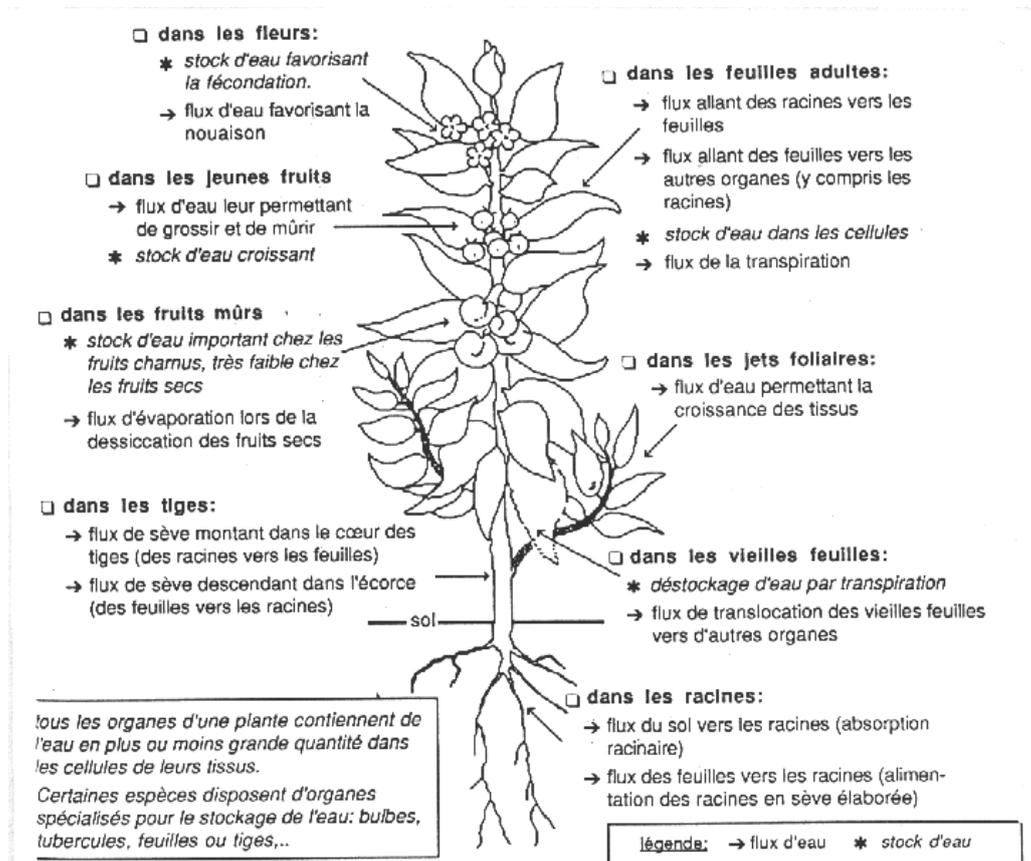
Même si rien n'apparaît à l'extérieur de la plante, l'eau y est constamment occupée à régler diverses fonctions. Cette régulation s'effectue à travers des mécanismes chimiques et physiques.

### Mécanismes chimiques

absorption des sels minéraux	par les racines
translocation des sels minéraux	déplacement d'un organe à l'autre
combinaison de O et H <sub>2</sub> de l'eau avec C et N	dans le cadre de la photosynthèse

### Mécanismes physiques

transpiration	régulatrice des flux d'eau traversant la plante OU régulatrice de la température des tissus
turgescence des cellules ou déturgescence	en fonction de leurs besoins.



La figure infra rappelle l'ensemble des fonctions remplies par l'eau dans une plante.

N.B : la transpiration s'effectue à travers de minuscules perforations existant à la surface des feuilles appelées **stomates**<sup>100</sup>.

## 23 Résistance à la circulation de l'eau

### 23.1 Au niveau de la plante

Le **wilt** se définit comme un flétrissement résultant de l'obstruction des vaisseaux de la plante par des bactéries.

Le **ceinturage** des arbres arrête le flux de sève élaborée descendant vers les racines qui ne peuvent dès lors croître.

Les **blessures** occasionnées par les coups et les chancres peuvent interrompre le flux à l'intérieur de la plante.

### 23.2 Au niveau du sol

Il est bien évident qu'un sol desséché ne peut apporter de l'eau à la plante.

## 24 Loi de Darcy généralisée

### 24.1 En milieu unidimensionnel

La loi expérimentale de Darcy  $v = K \frac{\Delta H}{\Delta L}$  établit une relation linéaire entre la vitesse de filtration  $v$  et  $\Delta L$

la perte de charge  $\Delta H$  à la traversée d'un élément de longueur  $\Delta L$ .

La forme unidimensionnelle s'écrit

$$v = K \frac{dH}{dx}$$

Les points du domaine pour lesquels la charge  $H$  possède la même valeur à cet instant  $t$  sont ceux situés sur une surface appelée la surface isopièze<sup>101</sup> de cote  $H$ .

Dans le cas d'un écoulement unidimensionnel les surfaces isopièzes sont représentées par des plans perpendiculaires à la direction de l'écoulement.

C'est l'**extension** de cette loi à un écoulement unidimensionnel puis **tridimensionnel** et aux milieux **isotropes**<sup>102</sup> et **anisotropes** qui constitue la généralisation de la loi de Darcy.

### 24.2 En milieu tridimensionnel isotrope

L'on se trouvera avec la forme tridimensionnelle, si la distribution de la charge  $H$  au temps  $t$  est donnée par :

$$H = f(x, y, z, t)$$

Un milieu perméable est dit isotrope lorsque la perméabilité  $K$  présente la **même valeur** dans toutes les directions autour d'un point.

Dans un tel milieu tridimensionnel, la vitesse est un vecteur  $\rightarrow\rightarrow$

$$V = -K \text{ grad } H$$

ses composantes deviennent

$$v_x = -K \frac{dH}{dx}$$

$$v_y = -K \frac{dH}{dy}$$

$$v_z = -K \frac{dH}{dz}$$

de plus le vecteur vitesse reste orthogonal à la surface isopièze.

### 24.3 En milieu tridimensionnel anisotrope

<sup>100</sup>το στόμα : la bouche

<sup>101</sup>ίσος, η, ο : égal et η πίεση : la pression

<sup>102</sup>ίσος, η, ο : égal et η τροπή : le tour

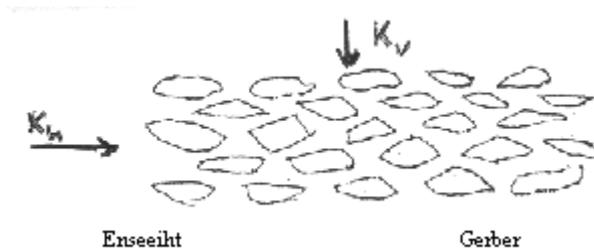
### 243. 1 Aspect expérimental

Dans un tel milieu le coefficient de perméabilité se révèle **différent** suivant la direction autour du point étudié.

L'expérience montre que les matériaux naturels sont rarement isotropes, en particulier les roches sédimentaires, les alluvions, dont les éléments se sont déposés par plans horizontaux, présentent une perméabilité verticale  $K_v$

inférieure à la perméabilité horizontale  $K_h$ .

Cette différence est due non à la dimension des particules mais à leur forme et à leur assemblage. cf. croquis *infra*



Leur plus grande dimension se situe en général dans le plan de sédimentation horizontal.

### 243. 2 Aspect théorique

- Rappel du gradient

Dans un milieu terreux avec un liquide en charge, le champ des vitesses de filtration dérive d'un

→→

potentiel ou charge hydraulique  $H$  et constitue un champ de gradient  $V = \text{grad } H$

Par application de la loi de Darcy l'on introduit  $K$  coefficient de perméabilité (conductivité hydraulique) et le signe  $-$  car la charge baisse vers l'aval et la vitesse doit rester positive.

→→

$$v = -K \text{ grad } H$$

- Vecteur vitesse

L'on pose que chaque composante du vecteur vitesse en un point est fonction linéaire des composantes du gradient de charge en ce point soit :

$$v_x = K_{11} \frac{dH}{dx} + K_{12} \frac{dH}{dy} + K_{13} \frac{dH}{dz}$$

$$v_y = K_{21} \frac{dH}{dx} + K_{22} \frac{dH}{dy} + K_{23} \frac{dH}{dz}$$

$$v_z = K_{31} \frac{dH}{dx} + K_{32} \frac{dH}{dy} + K_{33} \frac{dH}{dz}$$

Ces quantités  $K_{rs}$  appelées "coefficient de perméabilité" constituent les composantes d'un **tenseur** de deuxième ordre et l'on écrira l'équation unique :

→→

$$v = -K \text{ grad } H \quad (\text{indépendante des axes de référence})$$

Cette équation peut être résolue par le système de Cramer en faisant intervenir des coefficients de résistivité.

- Variation de la vitesse

On l'obtient par résolution la formule suivante :

$$\frac{dH}{ds} = -\frac{2}{\Lambda} \quad (\Lambda : \text{forme quadratique, définie, positive})$$

$ds$   $v$

$v$  reste indépendante du choix des axes, le vecteur  $v$  a une direction différente du gradient de charge,  $dH / ds < 0$ , donc la charge baisse avec l'écoulement

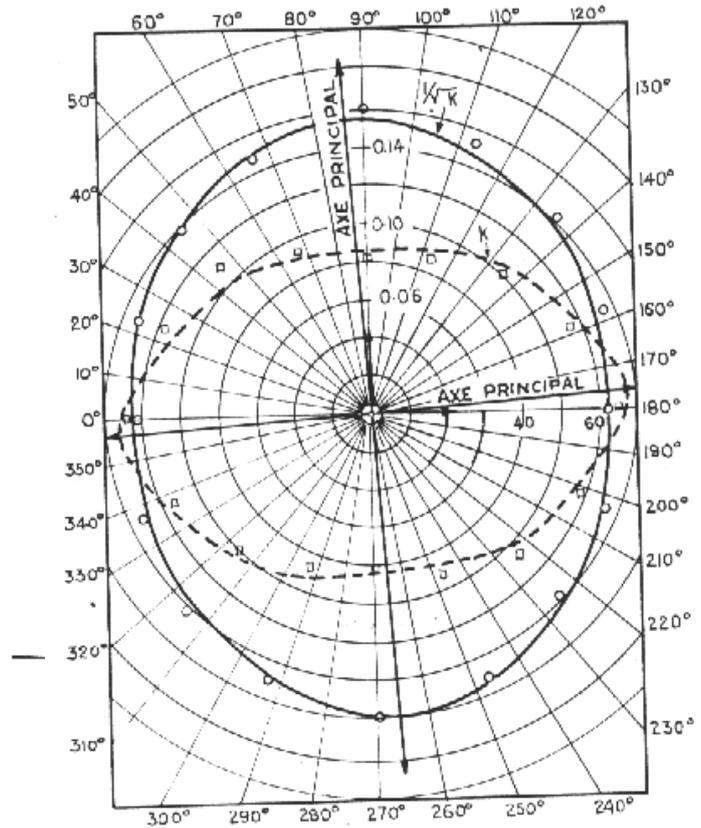
- Variation avec la perméabilité

Soit  $K_s$  la perméabilité ordinaire

Soit  $K_n$  la perméabilité orthogonale à l'isopiète.

Pour changer les axes, on introduit les cosinus directeurs de la surface isopiète, on définit les **axes principaux** de perméabilité.

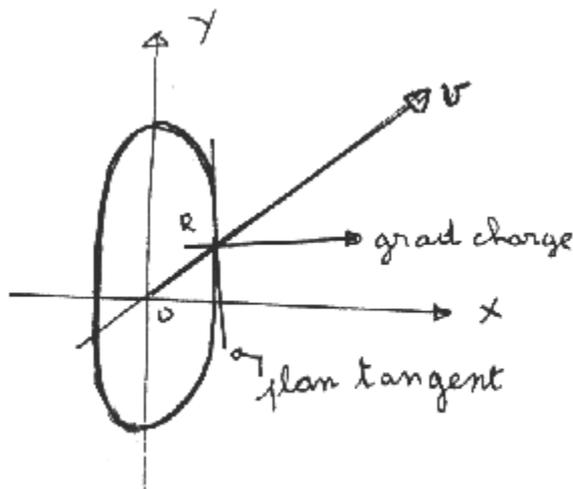
cf. diagramme polaire ci-contre



Enseeiht

Gerber

- Utilisation pour une étude



L'on aboutit enfin à une éllipsoïde <sup>103</sup> de forme

$$K'_1 x^2 + K'_2 y^2 + K'_3 z^2 = b^2$$

avec  $K_s = \frac{OR^2}{b^2}$

cf. graphique ci-contre

103 Enseeiht empse et το ειοος : ia forme

Gerber

## 3 Stockage tellurique<sup>104</sup> et cession aux plantes

### 31 Teneur en eau. Profil hydrique

#### 31.1 Expression de la teneur en eau d'un sol(ou humidité du sol)

##### 311.1 Les quatre expressions

Soit en effet une éprouvette de terre de volume total .....  $V$  et de masse à l'état sec .....  $M$ .

Si le volume des vides géométriques accessibles à l'eau ou à l'air est .....  $V_v$   
la porosité géométrique  $P$  est le rapport .....  $\frac{V_v}{V}$

la densité apparente de l'éprouvette  $\rho_a$  sera .....  $\frac{M}{V}$

Soit  $m$  la masse d'eau contenue dans l'éprouvette, on peut définir **quatre** teneurs en humidité :

-  $\tau_1 = \frac{m}{M} = \frac{m}{\rho_a V}$ , la teneur est exprimée en g d'eau par g de terre sèche

$[\tau_1] = M^0 L^0 T^0 = 1$  (invariant dimensionnel)

-  $\tau_2 = \frac{m}{M+m} = \frac{m}{m + \rho_a V}$  la teneur est exprimée en g d'eau par g de terre humide

$[\tau_2] = M^0 L^0 T^0 = 1$  (invariant dimensionnel)  $\tau_2$  est dite capacité au champ

-  $\tau_3 = \frac{m}{V}$  la teneur est exprimée en g d'eau par  $\text{cm}^3$  de terre

$[\tau_3] = M L^{-3}$  (homogène à une densité absolue)

-  $\tau_4 = \frac{m}{V_v} = \frac{m}{PV}$  la teneur est exprimée en g par  $\text{cm}^3$  de l'espace poreux

$[\tau_4] = M L^{-3}$  (homogène à une densité absolue)

##### 311.2 Exemple

Soit un sol de densité apparente  $\rho_a = 1,25$ , de porosité  $P = 0,50$   
supposons :  $\tau_1 = 0,40$  (0,40 g d'eau par g de terre sèche)

il vient  $\tau_3 = \tau_1 \cdot \rho_a = 0,40 \times 1,25 = 0,50$  (0,50 g d'eau par  $\text{cm}^3$  de terre)

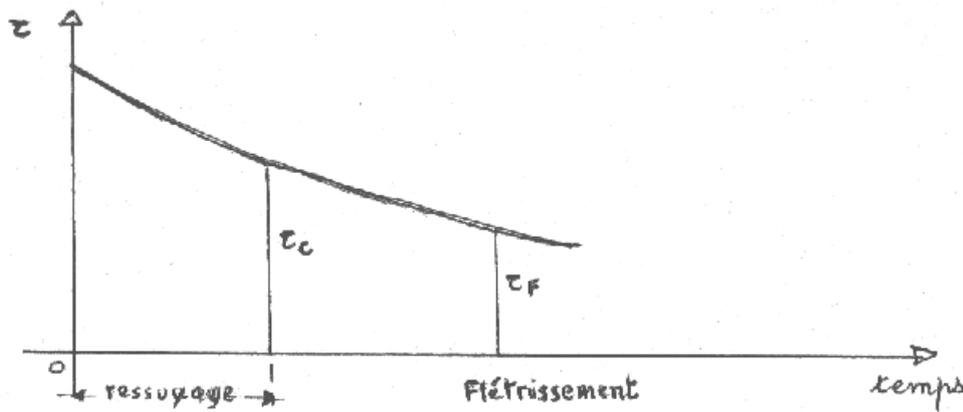
et  $\tau_4 = \tau_3 \cdot 1/P = 0,50 / 0,50 = 1$  (1 g d'eau dans  $1 \text{ cm}^3$  de l'espace poreux)  
ce qui correspond à un **sol saturé**, car 1 g d'eau occupe  $1 \text{ cm}^3$ .

#### 31.2 Capacité de rétention

L'eau contenue dans la partie supérieure du sol, après 48 heures de ressuyage, présente une teneur en humidité correspondant à un état d'équilibre qui définit la **capacité de rétention**  $\tau_c$ .

<sup>104</sup> du latin tellus, -uris : le sol

cf. graphique infra



Sans apport nouveau avec le temps la teneur en humidité baisse et atteint une valeur correspondant au point de flétrissement, en ce cas la capacité devient  $\tau_F = 0,54 \tau_c$

**31. 3**  
**Profil hydrique**  
**ou isochrone**

**d'humidité**

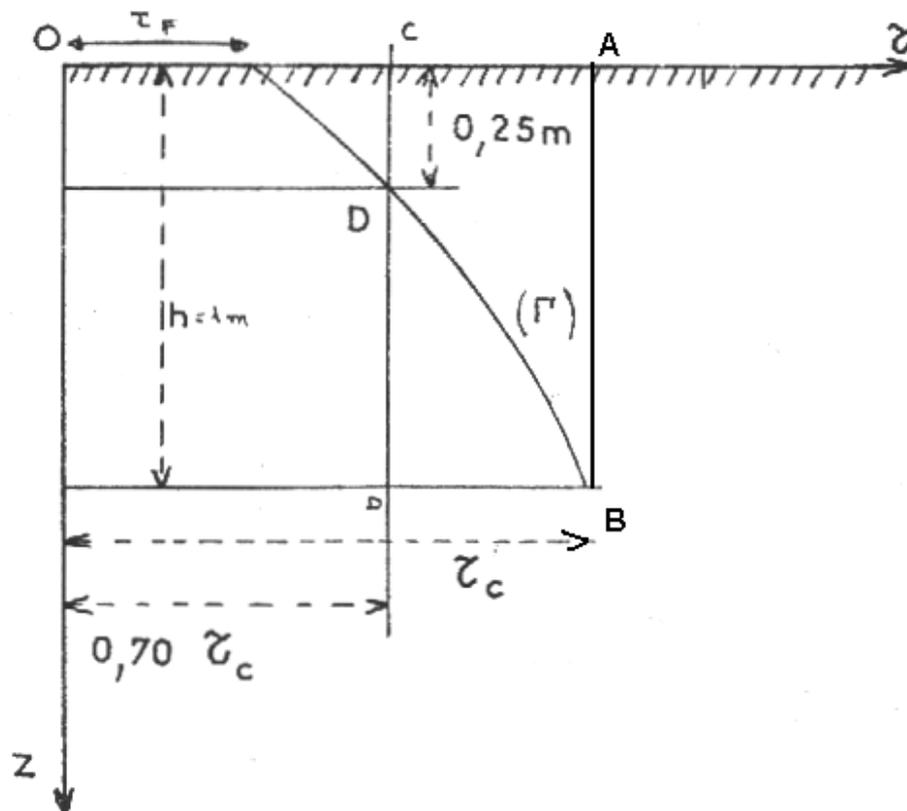
Dans le dessein d'éviter un déficit hydrique pour la plante, on estime qu'à 0,25 m de profondeur la teneur en humidité doit rester  $\dots \geq 0,70 \tau_c$ , ce qui constitue un critère d'arrosage.

Après ressuyage consécutif à une pluie tombée le jour  $j_1$  la courbe  $\tau(z)$  OU **profil hydrique** est représentée par la droite AB.

$\tau$  étant donné en  $m^3$  eau par  $m^3$  de terre, la quantité d'eau météorique infiltrée par la pluie du jour  $j_1$  serait l'aire AB  $\tau_F$  elle est égale à la dose d'arrosage à apporter sans pluie nouvelle

$$V = \int_0^h (\tau_c - \tau_F) dz$$

cf graphique infra



Si le jour  $j_2$  il tombait une pluie et la courbe isochrone d'humidité ou profil hydrique serait représentée par la droite CD après ressuyage

Dans ce cas la dose d'arrosage deviendrait moindre et serait égale à :

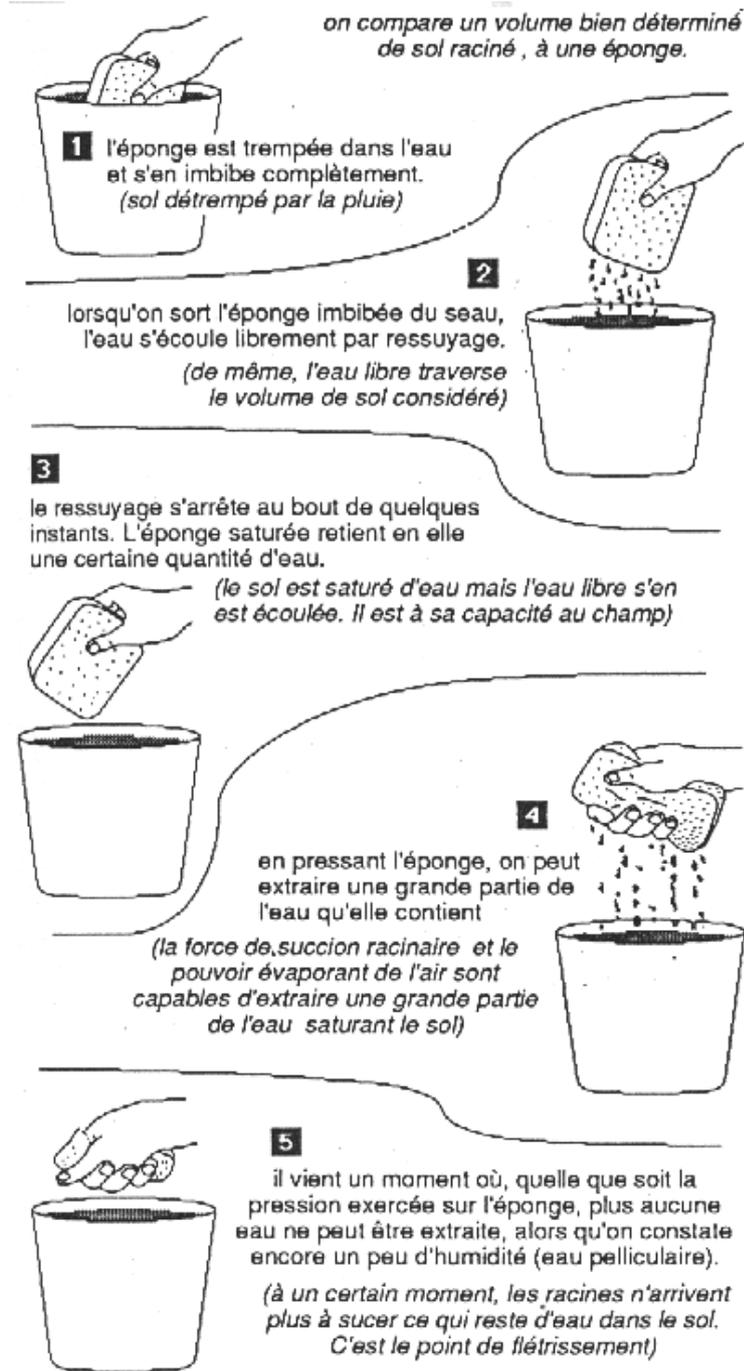
$$V = \int_{z_D}^h (\tau_c - \tau_D) dz$$

## 32 Humidité ou teneur en eau

### 32.1 Critères

En agriculture deux points importent particulièrement :

- la capacité du sol à **retenir l'eau** qu'il reçoit
- la capacité du sol à **céder l'eau** aux plantes



Le schéma ci-contre, comparant le sol à une éponge permet de subdiviser toute l'eau qui se trouve dans un volume de sol en deux parts :

- l'eau libre, qui peut circuler librement sous l'effet de la force de pesanteur,
- l'eau fixée, qui est retenue dans le sol par le jeu des forces de capillarité et de tension superficielle.

- une partie peut être sucée par les racines,
- une autre partie **ne** le peut **pas**, car la force de rétention est supérieure à la force de succion exercée par les racines, on dit que cette eau non assimilable par les racines est captive.

Chemins de l'eau

Dupriez

### 321.1 Capacité au champ

Il s'agit de la capacité du sol à contenir de l'eau, ce critère agricole correspond au critère physique

$$\tau_2 = \frac{m}{M + m}$$

M + m

défini au paragraphe 311.1 il s'exprime en g d'eau par g de terre humide, puisqu'il s'agit d'une capacité de rétention.

### 321. 2 Capacité utile

Elle se définit comme la quantité d'eau que le sol peut céder aux plantes **après** avoir été saturé à sa capacité au champ.

Cette capacité reste f (**type de sol, variété de plante**). De même qu'une main d'adulte retirera plus d'eau d'une éponge qu'une main d'enfant, un plant de sorgho peut sucer de l'eau dans un sol où la courge aurait atteint le point de flétrissement.

### 32.2 Mesures

#### 322. 1 Capacité au champ

Sur une parcelle bien détrempée par la pluie, découpons une motte de terre, posons la sur le plateau d'une balance et effectuons la pesée:

pois de la motte saturée d'eau.....6 520 g

Mettons à sécher la motte au soleil puis repesons la :

pois de la motte.....5 650 g

La différence entre les deux correspond au poids de l'eau contenue dans les pores du sol<sup>105</sup>

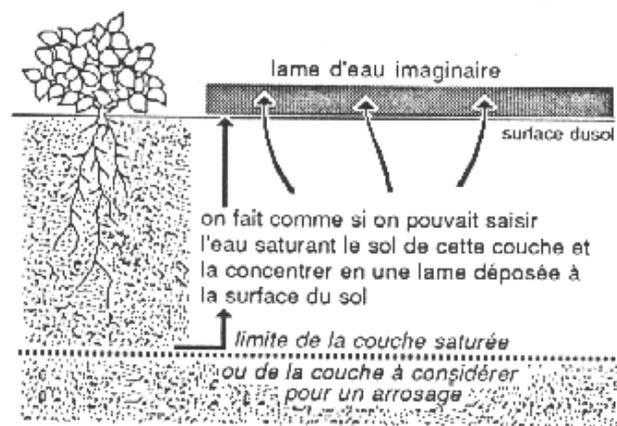
.....870 g

La capacité au champ :  $\frac{870 \text{ g d'eau}}{6 520 \text{ g sol saturé}} = 0,133$

On dit aussi que la capacité au champ égale 13,3 % eau , il s'agit d'un nombre sans dimension, cf.  $\tau_2$

#### 322. 2 Capacité utile

Dans le schéma ci-contre on a agi comme s'il était possible de ramener toute l'eau contenue dans le volume de sol dans une lame déposée à la surface.



Chemins de l'eau

Dupriez

Cela amènerait donc à une expression en mm de la réserve d'eau contenue dans le volume de terre.

Réciproquement avec une lame d'eau de 40 mm sur un sol tari, on constate en creusant que la terre est saturée jusqu'à 1000 mm .Donc si les racines descendent à 500 mm, il faudra que la pluie apporte 20 mm pour saturer cette couche de 500 mm. A ce moment, le sol présente une capacité utile intéressante.

### 32. 3 Variation des critères en fonction du sol

L'on remarquera dans le tableau infra que toute l'eau de la capacité au champ ne sera pas utile pour les plantes.

critères	sable pur	sol limoneux	argile pure
capacité au champ en % poids de sol saturé	3 à 6	12 à 18	25 à 45
capacité utile en % poids de sol saturé	2 à 3	6 à 8	13 à 20

<sup>105</sup> Si on chauffe sur une tôle la motte desséchée, elle perdra de l'eau , il restera la matière sèche

### 33 Niveau énergétique de l'eau dans le sol

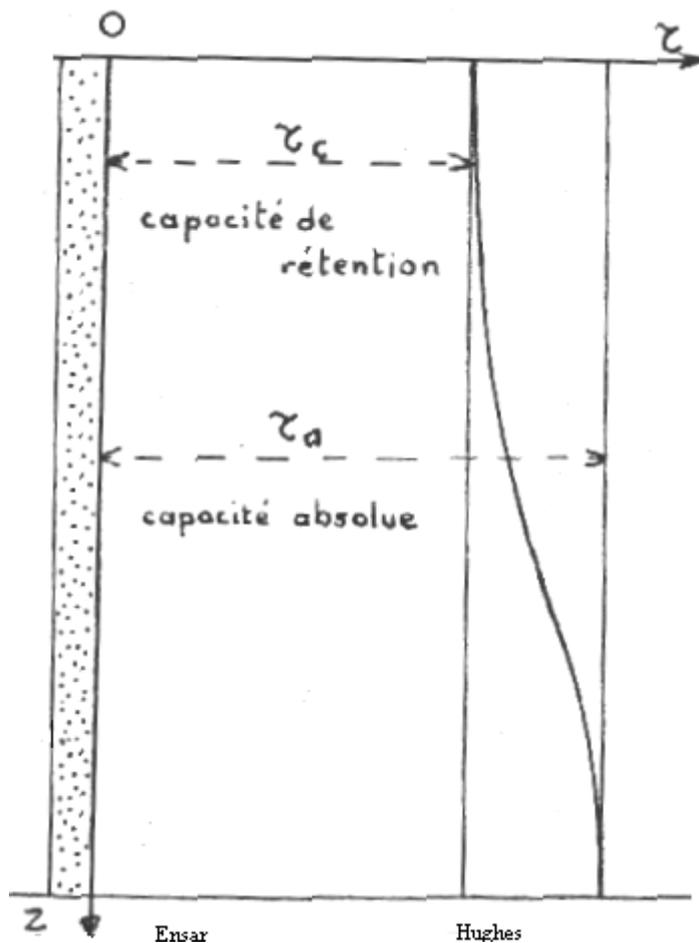
#### 33. 1 Terminologie

##### 331. 1 Capacité de rétention

Au paragraphe 31.2 il a été défini la capacité de rétention  $\tau_c$  comme la teneur en humidité, après 48 heures de ressuyage, correspondant à un état d'équilibre.

##### 331. 2 Capacité absolue

Il a été observé *in vitro* que dans une colonne de sol, de faible hauteur (36 mm) et de faible diamètre (60 mm) le taux d'humidité du sol restait voisin de la capacité absolue  $\tau_a$  (95 %).



Schloesing a remarqué que dans une colonne de terre de grande hauteur soumise au ressuyage, la teneur en humidité variait selon la verticale.

Cf. croquis ci-contre

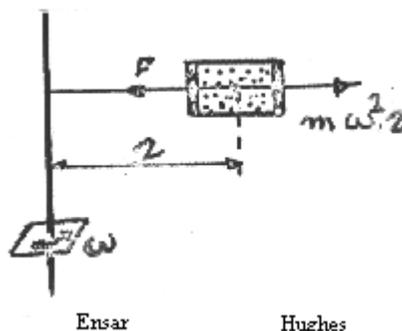
Cette teneur reste sensiblement égale à la capacité **absolue** dans les couches **inférieures**, alors qu'elle devient voisine de la capacité de rétention du sol en place dans les parties hautes de la colonne.

##### 331. 3 Point de flétrissement

Lébedeff a soumis un échantillon de terre à une accélération de 1 000 g, le taux d'humidité obtenu correspondait à la capacité de rétention.

Lorsqu'il a porté l'accélération à ..... 15 850 g il a constaté que la teneur en eau atteignait celle du point de flétrissement.

cf. schéma ci-contre



### 33. 2 Notion de potentiel capillaire $\psi$ d'un sol

#### 332. 1 Définition

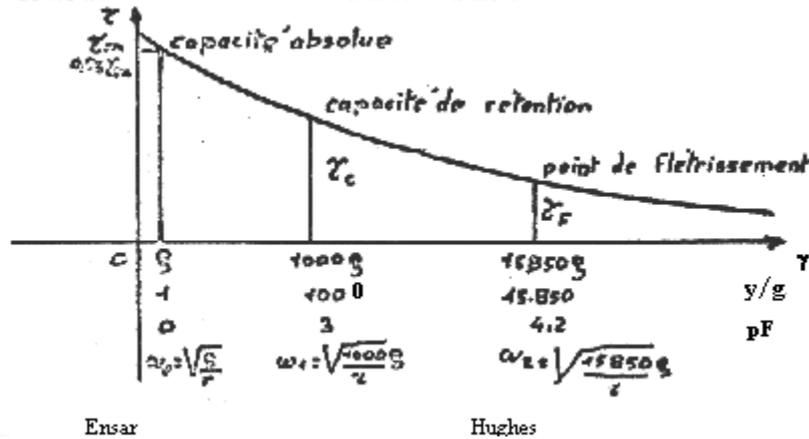
Lors de la centrifugation supra, la force de rétention qui s'exerce à l'équilibre sur l'eau interstitielle de masse  $m$  est :

$$f = m \gamma \quad \text{mais} \quad f = m \omega^2 r$$

$$\gamma = \omega^2 r$$

donc

cette accélération centrifuge représente la force de rétention s'exerçant sur l'unité de masse, d'où la courbe infra teneur d'humidité en  $f(\gamma)$ .



Comparons les forces de rétention  $f$  au poids de l'eau retenue  $p = mg$

$$\psi = \frac{f}{p} = \frac{m \gamma}{m g} = \frac{\gamma}{g}$$

$\psi$  représente le **potentiel capillaire** indiquant la pression de l'eau dans le sol

On donne le nom de pF du sol à la quantité:

$$pF = \log_{10} \psi$$

La courbe supra  $\tau = f(\psi)$  montre

QUE pour une teneur en humidité égale à la capacité de rétention

$$\psi = 1000 \quad \text{donc} \quad pF = 3$$

QUE pour une teneur en humidité égale à celle du point de flétrissement

$$\psi = 15850 \quad \text{donc} \quad pF = 4,2$$

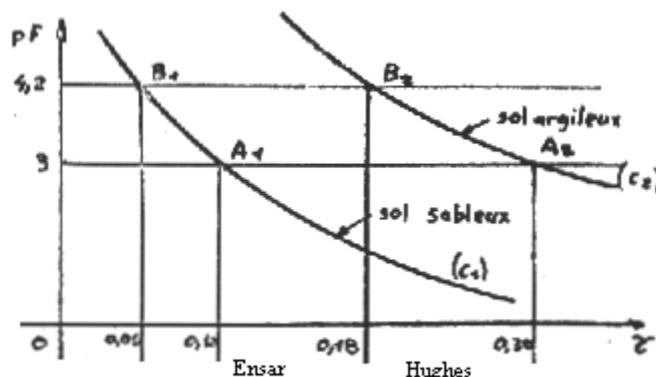
#### 332.2 Expression graphique

Construisons la courbe  $pF = \phi(\tau)$  pour des terres de nature différente, nous obtenons des courbes telles que  $C_1$  et  $C_2$ .

$\psi$ , donc le pF baissera si la teneur en humidité augmente

$\psi$ , donc le pF augmentera si la granulométrie baisse à  $\tau = \text{constante}$

cf. graphique infra



Nous sommes amenés à constater :

- les points  $A_1, A_2, A_3 \dots$  ayant pour abscisses les capacités de rétention respectives des divers sols se placent sensiblement sur une parallèle à l'axe des abscisses d'ordonnée... 3.
- les points  $B_1, B_2, B_3 \dots$  dont les abscisses représentent les points de flétrissement respectifs des divers sols se placent de même sensiblement sur la parallèle d'ordonnée .... 4, 2.

### 332. 3 Mesure du potentiel capillaire $\Psi$

#### •Principe du tensiomètre

Il permet de mesurer, à des profondeurs déterminées, l'évolution des tensions et de renseigner sur la disponibilité en eau des cultures. Il indique la force que doit exercer la racine pour extraire l'eau du sol.

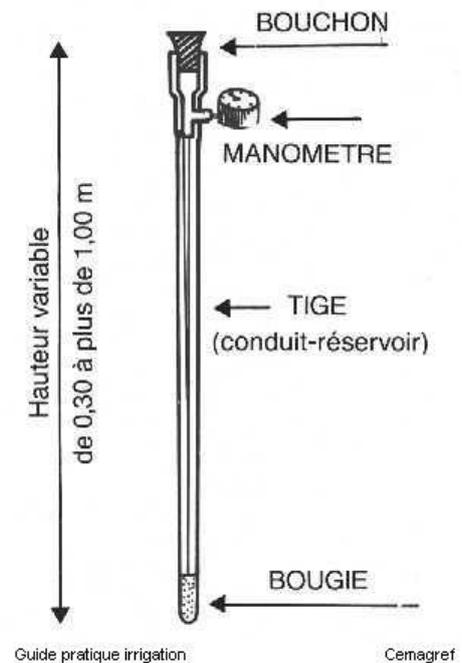
La bougie poreuse est donc placée dans le sol à la profondeur voulue,

- lorsque le sol tend à se dessécher elle lui restitue de l'eau, dans ce cas le réservoir étant étanche, il se produit par rapport à la pression atmosphérique ambiante, une dépression mesurée par le manomètre,
- si le sol est réhumidifié, la dépression provoque un retour de l'eau dans la bougie poreuse et le manomètre indique le nouvel équilibre obtenu

En bref :

beaucoup d'eau = faible tension  
peu d'eau = forte tension

cf. schéma ci-contre



- Application aux pilotage de l'irrigation à la raie  
Ces propriétés servent à utiliser les doses d'eau judicieuses pour éviter le gaspillage comme le flétrissement.

### 33. 3 Récapitulatif énergétique

L'eau du sol est soumise à un champ de forces dérivant :

- du potentiel gravitaire,
- du potentiel capillaire.

La somme des deux représentant la charge hydraulique ou potentiel hydraulique

## 34 Facteurs agronomiques et teneur en eau utile

### 34. 1 Façons superficielles

Le but des façons superficielles consiste à modifier le profil cultural, à le stabiliser et à améliorer la structure ; autant d'actions favorables à l'infiltration de l'eau puisqu'elles augmentent la porosité du sol en y créant des aspérités et des fissures.

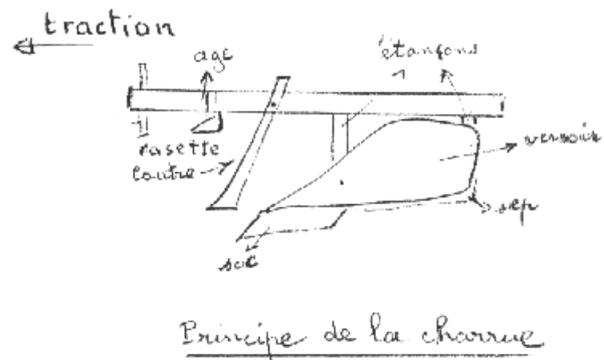
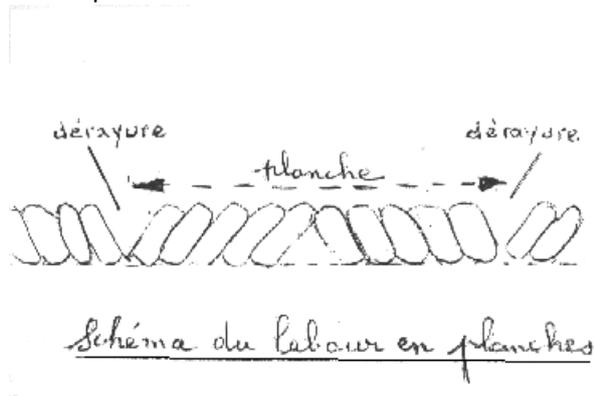
#### 341. 1 Sur sol pouvant être remué

- Labour

Il consiste à retourner le sol sur une profondeur plus ou moins importante à l'aide d'une charrue.

- la bande de terre est tranchée **verticalement** par le coutre,
- la bande de terre est tranchée **horizontalement** par le soc,
- la bande de terre est **retournée** par le versoir.

cf. croquis infra



- Sous-solage

Il s'agit d'une opération pour diviser les couches profondes du sol ( en dessous de l'épaisseur labourée) parce qu'elles sont trop compactes pour permettre le passage de l'eau et des racines.

#### 341. 2 Sur sol ne pouvant être remué

Certains sols se prêtent mal aux façons supra, ainsi un sol défriché est parfois plus rapidement colmaté après labour que sans. Leur mise en culture justifie alors des façons minimales sans retournement et sur les zones de semis seulement.

- Pseudo-labours:

Ils sont effectués avec des scarificateurs, des herses.

- Roulage:

Cela sert à tasser la terre et à éviter l'excès de porosité lequel entraînerait une perte d'eau.

### 34.2 Couvert végétal

Le couvert végétal exerce une influence directe sur l'économie en eau d'un sol, la végétation arborée s'avère particulièrement positive sur ce point.

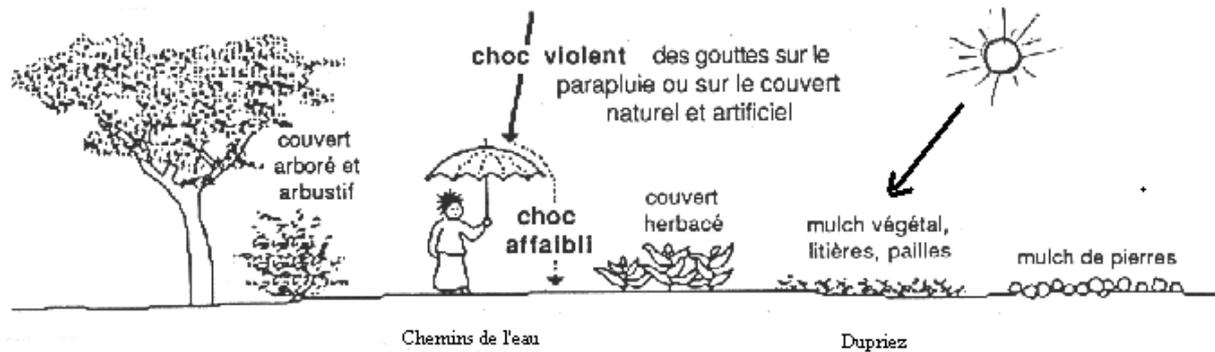
En culture l'on utilisera les procédés suivants pour remplacer le couvert végétal.

### 342. 1 Le paillage

Ils préservent le sol contre le choc des gouttes de pluie créant la battance, ils garantissent la porosité du sol et ses capacités d'infiltration.

Ajoutons que le paillage protège le sol contre les rayons solaires, évite son échauffement donc limite l'évaporation.

cf. croquis infra



Ainsi on placera un paillage entre une rangée de coton et une rangée de maïs.

### 342. 2 Mulching

L'on sème un "semis de couverture" la plante dite de couverture dépérira et déposera son mulch protecteur sur le sol protégeant ce dernier.

### 342. 3 Engrais verts

Il s'agit de cultures enfouies sur place, pour fournir de l'humus, par exemple : des légumineuses (luzerne) des crucifères (colza) ...

En pourrissant, les matières enfouies améliorent la structure du sol et y laisseront des galeries à travers lesquelles l'eau pourra circuler vers les couches profondes.

# Action anthropique sur les flux

## En liminaire

Le présent cours traitera des flux *stricto sensu*, c'est-à-dire des quantités d'eau en mouvement induites par l'action humaine et non pas de la qualité de l'eau laquelle relève d'un autre enseignement.

## 1 Interactions anthropiques<sup>106</sup> à l'échelle terrestre

### 11 Activités humaines influençant directement les rivières

### 12 Activités industrielles influençant les flux

## 2 Interactions dans l'unité d'intervention

### 21 Assollement et cultures dérobées

### 22 Drainage

### 23 Irrigation

## 3 Interactions à l'échelle d'un bassin-versant

### 31 Généralités

### 32 Influence sur le régime des cours d'eau

### 33 Influence sur la nappe aquifère

### 34 Influence des lacs artificiels

## 4 Erosion anthropique

### 41 Définition

### 42 Conséquences humaines et économiques

### 43 Origines humaines de l'érosion

### 44 Principes anti-érosifs

### 45 Pratiques anti-érosives en zone rurale

### 46 Gestion écologique anti-érosive en zone urbaine

## 5 Modifications des flux des cours d'eau

### 51 Situation et caractéristiques techniques

### 52 Caractéristiques hydrologiques du Rhône court - circuité

### 53 Caractéristiques potamologiques du Rhône court - circuité

### 54 Caractéristiques biologiques du Rhône court - circuité

### 55 Evolution suite à la création de la chute

## 6 Quelques aménagements fluviaux

### 61 Méthodes des aménagements à courant libre

### 62 Types d'aménagements

---

<sup>106</sup>ο άνθρωπος : l'homme

# 1 Interactions anthropiques à l'échelle terrestre

## 11 Activités humaines influençant directement les rivières

### 11.1 Drainage

Ceci entraîne un changement dans l'écoulement superficiel ou hypodermique.

### 11.2 Protection contre les crues

Ceci apporte des modifications sur les lits mineur et majeur du cours d'eau considéré.

### 11.3 Barrage et réservoir subséquent

Dans le réservoir, l'eau séjourne un temps variable, le niveau fluctue également en fonction des apports et des lâchures. Il modifie profondément l'hydrogramme de la rivière, en soutenant le débit d'étiage et en écrêtant les crues.

### 11.4 Endiguement

Il constitue un facteur de discordance entre les "avaliers" et les "amontiers". En effet, l'endiguement à l'endroit où il est réalisé protège bien les riverains contre la colère du fleuve, mais il accélère l'eau et les riverains de l'aval essuient une crue aggravée par la vitesse.

### 11.5 Canalisation d'une rivière

#### 115. 1 Objectif :

Il consiste à améliorer certains points tels que : minoration des crues, drainage des terres voisines, prévention de l'érosion et navigation.

#### 115. 2 Conséquences

La pente change par resserrement

la profondeur et la largeur sont modifiées par dragage

la rugosité est différente en raison du coupage des herbes

La pente ayant augmenté à cause du resserrement, l'énergie motrice de l'eau doit être dispersée sur

une surface plus

petite. Il s'ensuit que

l'eau arrachera plus

de sédiments aux

rives, d'où nécessité

de réduire la vitesse

de l'eau.

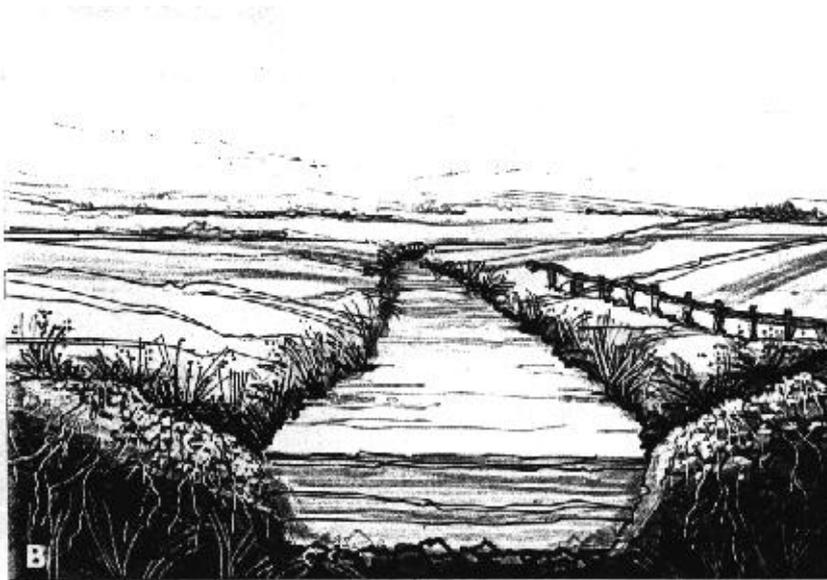
La canalisation d'une rivière transforme un système hétérogène



Europe's assesment

Dobris

cf. gravure A ci-contre



Europe's assesment

Dobris

en un système  
homogène

cf. gravure B ci-contre

la rivière devient  
uniforme.

Au Danemark par exemple, 95 % des rivières ont été canalisées.

### 11. 6 Détournement

Le lit existant devient désaffecté et la rivière emprunte donc un nouveau lit.

### 11. 7 Transfert inter bassin

A Montpezat dans l'Ardèche il est détourné des eaux de la Loire pour alimenter l'Ardèche. D'ores et déjà, une fraction des eaux de la Seine, par le truchement d'un canal, rejoint le bassin de la Somme.

### 11. 8 Décharge d'eau usée

Les rivières reçoivent les effluents des eaux d'égout plus ou moins bien traitées, ce qui accroît leur débit. Il arrive même par exemple à Clermont-Ferrand (150.000 hab.) que ce soit les eaux d'égouts majoritaires en débit qui diluent (!) les eaux du maigre ruisseau chargé de les recueillir pour les conduire à l'Allier.

### 11. 9 Dragage - Navigation

Pour que le tirant d'eau de la rivière navigable reste constant, ce qui s'avère capital pour la sécurité batelière, il faudra effectuer des dragages réguliers à cause des dépôts de sédiments.

Cela entraînera des modifications dans les échanges du cours d'eau avec la nappe souterraine.

**N.B.** Tout ceci peut, bien entendu, entraîner des effets biologiques tels que :

- destruction de la ripisylve, arbres, buissons
- baisse de la capacité d'absorption des matières organiques, par rapport à un marais ou à une rivière naturelle
- réduction du nombre et de la diversité des espèces aussi bien dans l'eau que sur les rives.

## 12 Activités industrielles influençant les flux

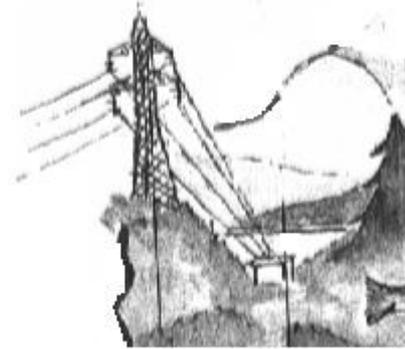
### 12. 1 Industrie énergétique

#### 121. 1 Barrage hydroélectrique

Ils furent nombreux à être créés entre 1900 et 1970

cf. croquis ci-contre

En dépit des précautions, ils peuvent être rompus, entraînant des crues particulièrement funestes (le Reyran à Fréjus en 1959). Le cycle de l'eau de la rivière se trouve considérablement modifié.

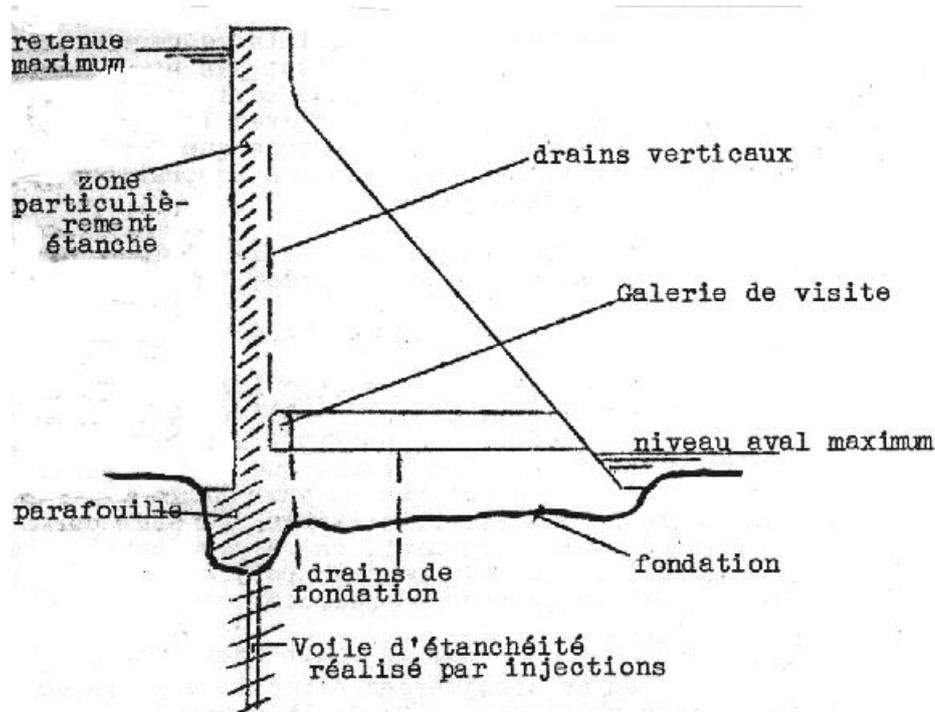


barrage de la Viadène

Boulac

Le dessin infra montre la coupe d'un barrage-poids, c'est-à-dire résistant à la pression de l'eau par son poids.

Pour éviter le phénomène d'infiltration et le renversement par la poussée d'Archimède, on place des drains et un voile d'étanchéité. Cf croquis infra



## 122. 2 Charbon, pétrole et nucléaire.

Les centrales thermiques consomment d'énormes quantités d'eau pour le refroidissement. Elles se situent en général près des fleuves dont elles augmentent la température.

Les mines de charbon demandent un drainage important qui véhicule des eaux acides nuisibles pour les rivières. Celles qui sont exploitées à ciel ouvert érodent le sol.

cf. photographie infra prise à Leipzig



Signalons qu'à Saint-Etienne, les houillères furent amenées à pomper l'eau pendant près de 2 siècles transformant le quartier de St Etienne dit " Le marais " en lieu constructible. Lorsqu'ils arrêterent de pomper en fermant la mine, l'eau revint dans les caves, les garages ... et la municipalité a dû poursuivre le pompage.

## 122. 3 Autres industries

La papeterie, la métallurgie, la chimie, le bâtiment consomment de grandes quantités d'eau pour constituer leur matière, l'agro-alimentaire également :

500 l d'eau / hectolitre de bière

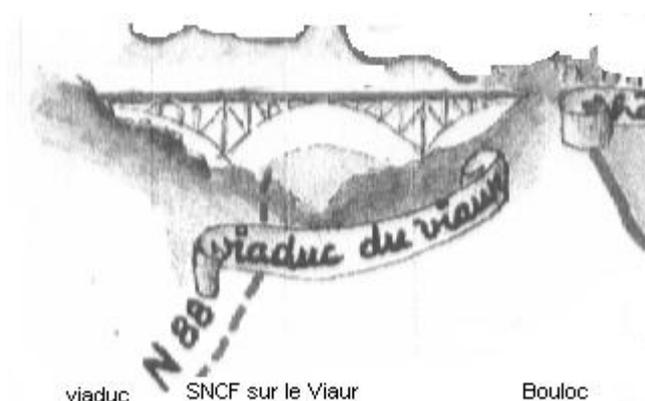
30 l d'eau + 50 kg de chaux et 200 kg sable afin d'obtenir du mortier (le mortier est un mélange : chaux, sable, eau pour relier entre eux les éléments de maçonnerie).

240 l d'eau + 400 kg de chaux hydraulique + 1 640 kg de sable. + 1 300kg de gravier afin d'obtenir du béton

Il faut compter l'usage d'eau de refroidissement.

## 122. 4 Transport

Les constructions de route modifient l'écoulement superficiel des eaux de la zone, en accélérant la vitesse ; de même en ce qui concerne les aérodomes. Les ouvrages concernant les voies ferrées apportent aussi des modifications.



cf. schéma ci-contre

### 122. 5 Agriculture

Du temps où le laboureur exploitait ses terres en "bon père de famille" son activité garantissait le flux normal de l'eau. Mais l'agriculture « à l'américaine » a hélas rompu cet équilibre.

- La spécialisation : elle enlève le couvert végétal, ce qui augmente le ruissellement ; il n'existe pas de culture « dérobée » couvrant le sol en automne et en hiver (raves plantées après le blé).
- L'irrigation : elle entraîne un abaissement de la nappe phréatique pouvant amener une irruption de l'eau saumâtre en bordure de mer.
- Le drainage : il modifie l'écoulement superficiel.
- La mécanisation : elle contribue à augmenter le débit solide des cours d'eau et le compactage des sols accroît la battance et, partant, le ruissellement.

### 122. 6 Forêt

Les coupes claires favorisent l'érosion du sol et l'emploi d'engins mécaniques par compactage du sol accroît le ruissellement.

### 122. 7 Ski

Il induit des **surconsommations d'eau**. Dans les Alpes, il existe 4 000 canons à neige consommant- 28 millions de litres d'eau (28 000 m<sup>3</sup>) par km de piste.

### 122. 8 Habitation

La construction d'habitations entraîne une consommation d'eau pour la fabrication du béton et lorsque ces habitations sont occupées, il faut fournir aux gens de l'eau potable, qu'ils transforment par le lavage en eau usée.

cf. photographie infra .



Agence européenne

Dobrisaccement

A Paris : 400 l /personne/jour

A Chicago 930 l /personne/jour

## 2 Interactions dans l'unité d'intervention

Sur sa parcelle, le cultivateur peut évidemment influencer sur les flux d'eau, notamment par les actions suivantes.

### 21 Assolement et cultures dérobées

Si l'exploitant ne maintient un couvert végétal que de mars à juillet avec le semis d'un escourgeon (orge), il expose pendant le reste du temps, soit 6 mois/an, la parcelle à un **fort ruissellement**.

#### 22 Drainage

Si, au lieu de laisser un bas-fond en l'état, c'est-à-dire couvert de jonc et improductif, le cultivateur décide de l'assainir par un drainage recueillant l'eau et la conduisant par des rigoles jusqu'à un exutoire (ruisseau).

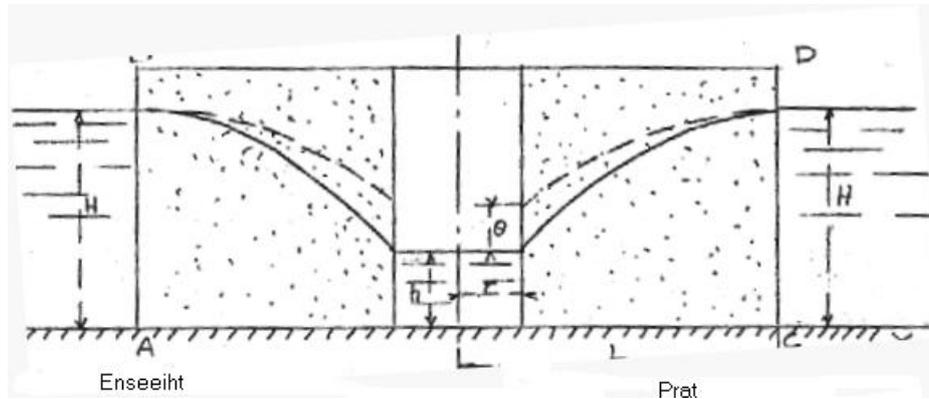
### 23 Irrigation

#### 23.1 Par de l'eau extérieure à la parcelle

Dans cette hypothèse, l'on constate un **transfert du flux** d'une parcelle à une autre. L'eau d'irrigation ne sera pas toute absorbée par les plantes..... Une partie rechargera la nappe phréatique.

### 23.2 Par de l'eau provenant d'un puits de la parcelle

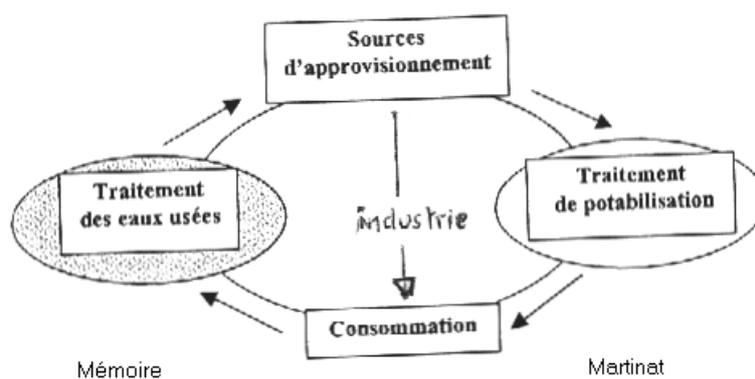
En ce cas, cf. croquis infra, la **nappe phréatique baissera**, le volume d'eau enlevé restant plus grand que celui restitué par infiltration.



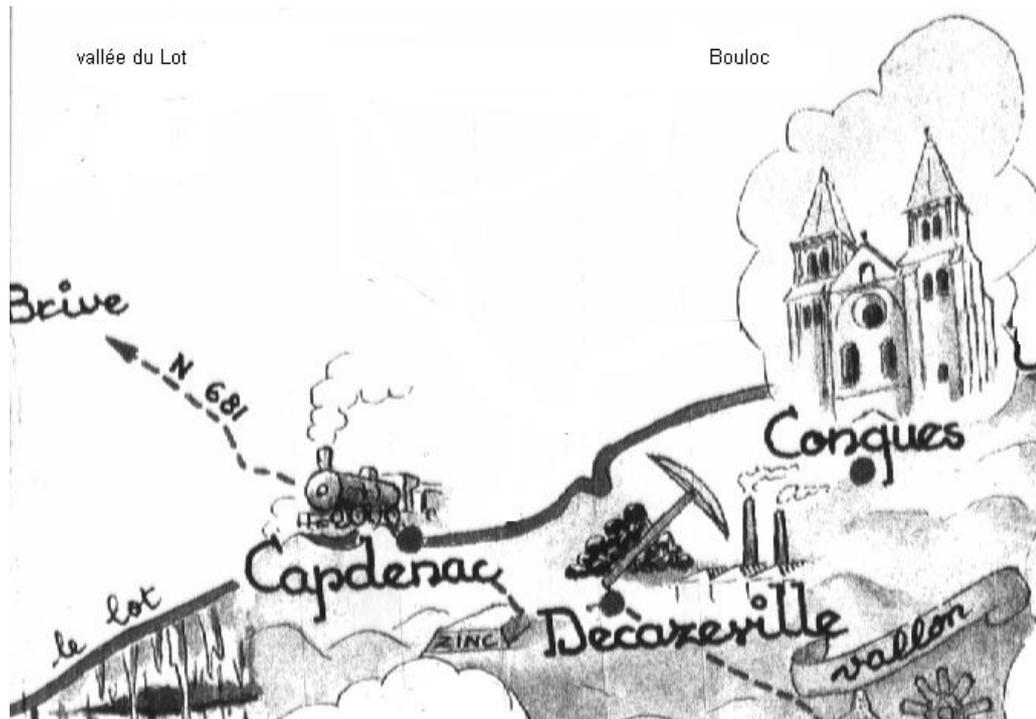
## 3 Interactions à l'échelle d'un bassin-versant

### 31 Généralités

Le cycle d'utilisation de l'eau et l'activité humaine peuvent se résumer par le schéma infra dans un bassin-versant.



MAIS l'action anthropique, cf . schéma infra pour le Lot, se manifeste dans le bassin plus régulièrement au niveau :



- de l'agriculture
- de la régulation de la rivière
- de la déforestation
- de prise d'eau à usage domestique ou industriel
- des rejets d'eau usée d'origine domestique ou industrielle

### 32 Influence sur le régime du cours d'eau

L'activité humaine affecte parfois lourdement le régime par les changements dans l'usage du sol, par la création de lacs artificiels, par l'utilisation partielle du débit...

#### 33 Influence sur la nappe aquifère

Pour diverses raisons telles que :

- le pompage pour des usages domestiques et industriels ou pour des besoins agricoles
- le drainage des puits de mine
- l'emploi d'eau de refroidissement

Une **surexploitation** de la nappe s'instaurera ; cela entraînera alors un déséquilibre qui mettra parfois des décennies pour se corriger.

#### 34 Influence des lacs artificiels

En France par exemple, ont été créées 240 retenues d'eau dont l'influence se manifeste fortement.

Les impacts se feront sentir sur les flux, aussi bien pendant la construction, qu'après, en



particulier par l'**augmentation du niveau** de l'eau à la fermeture du barrage laquelle entraîne comme dans le cas du lac infra les conséquences suivantes :

- la perte de terre agricole par submersion
- la disparition des villages noyés
- l'augmentation du niveau de la nappe aquifère mais aussi
- une atténuation du débit solide de la rivière, qui dans la retenue, se clarifie du fait des dépôts
- la pratique de la baignade et des sports nautiques

## 4 Erosion anthropique

### 41 Définition

L'érosion peut se définir comme le déplacement des composants du sol sous l'action de l'eau mouvement (ou de l'air). Ce phénomène peut être accéléré ou ralenti par l'action humaine.

### 42 Conséquences humaines et économiques

#### 42.1 Crues et inondations

L'augmentation du ruissellement due à la **déforestation** (zone rurale) ou à l'**imperméabilisation** (zone urbaine) augmente l'importance des crues, leur vitesse d'arrivée.  
cf. photographie infra



Chemins de l'eau

Dupriez

## 42. 2 Comblement des lacs et des barrages

Les barrages hydroélectriques construits dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle doivent être curés plus souvent désormais pour certains d'entre eux placés à l'aval de grandes villes.

De même les lacs s'ensavent, leur eau était devenue trouble et il fallut des travaux coûteux en ce qui concerne les lacs d'Annecy et du Bourget au moyen d'un égout en circumvallation pour leur redonner une eau claire.

## 42. 3 Disparition des terres cultivables

L'eau ruisselante entraîne avec elle sa charge de sels minéraux, d'argile, de matières organiques ; il arrive que la terre arable devienne insuffisante pour nourrir la population.

**Exemple** : Soit un marigot recueillant l'eau d'un bassin-versant de 1 ha, avec une pluie de 400 mm/an.

Donc (1 mm sur 1 ha = 10 m<sup>3</sup>) la quantité tombée = 4 000 m<sup>3</sup>

Avec 80 % de ruissellement, 3200 m<sup>3</sup> se retrouvent dans le marigot, avec sable, argile et sels minéraux.

Les historiens pensent que dans les pays du Levant, des civilisations connurent leur déclin à cause de ce phénomène.

## 43 Origines humaines de l'érosion

Les problèmes économiques liés au ruissellement et à l'érosion subséquente trouvent presque toujours leur origine dans les comportements humains. Notons entre autres :

- l'urbanisation galopante imperméabilisant les sols (goudronnage)
- la désarborisation excessive (charbons de bois à Madagascar)
- l'insuffisance des ouvrages lors d'aménagements fonciers (égout unitaire au lieu de séparatif)
- la pratique de feux intempestifs
- les méthodes de cultures inadéquates (laissant le sol nu entre deux récoltes)

D'une façon générale, il s'agit souvent de la recherche excessive d'investissement à moindre coût, ne tenant pas compte des obligations protectrices à l'égard des sols.

Dans les lignes qui vont suivre, on va décrire les principes anti-érosifs et examiner leur application tant en zone urbaine qu'en zone rurale.

## 44 Principes anti-érosifs

### 44. 1 Protection du sol contre la pluie

Le choc de la goutte sur le sol, qui tombe à une vitesse de 30 km/h, ainsi que le ruissellement subséquent se trouvent très amoindris, si des **arbres** sont plantés car par leur feuillage d'UNE PART, et par la litière (feuilles mortes) D'AUTRE PART qu'ils déposent sur le sol le protège.

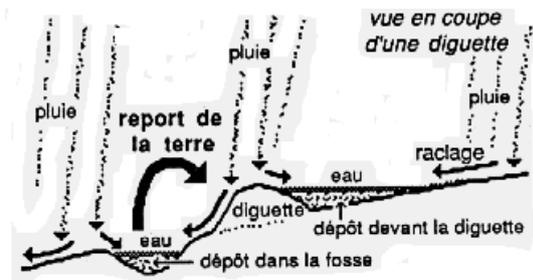
### 44. 2 Maintien de l'eau là où elle tombe

**44.2. 1 En zone urbaine** dense, on prévoit des bassins d'infiltration (urbain) sous des espaces verts,



cf. photographie ci-contre

**442. 2 Enzone rurale** aussi, cela suppose des aménagements d'ouvrage : on construit des diguettes

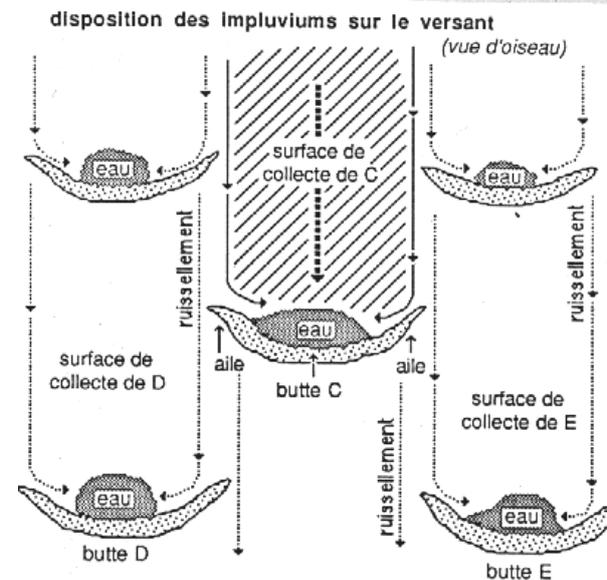


cf. schéma ci-contre

- └ l'eau s'accumule devant la diguette et dans la fosse
  - └ la terre arrachée à la diguette par les pluies est récupérée dans la fosse; on peut facilement la reprendre pour reconstituer la diguette
  - └ les alluvions déposées devant la diguette ont tendance à former une petite terrasse plane. La surface d'infiltration s'en trouve agrandie après chaque pluie.
- chemins de l'eau Dupriez

il est installé des impluvia (impluvium)

cf. schéma ci-contre



- └ les surfaces de collecte sont disposées en quinconce de telle sorte que l'eau ne puisse jamais ruisseler sur de grandes longueurs. Les ailes sont profilées de façon à concentrer l'eau vers le centre de la fosse.

chemins de l'eau

Dupriez

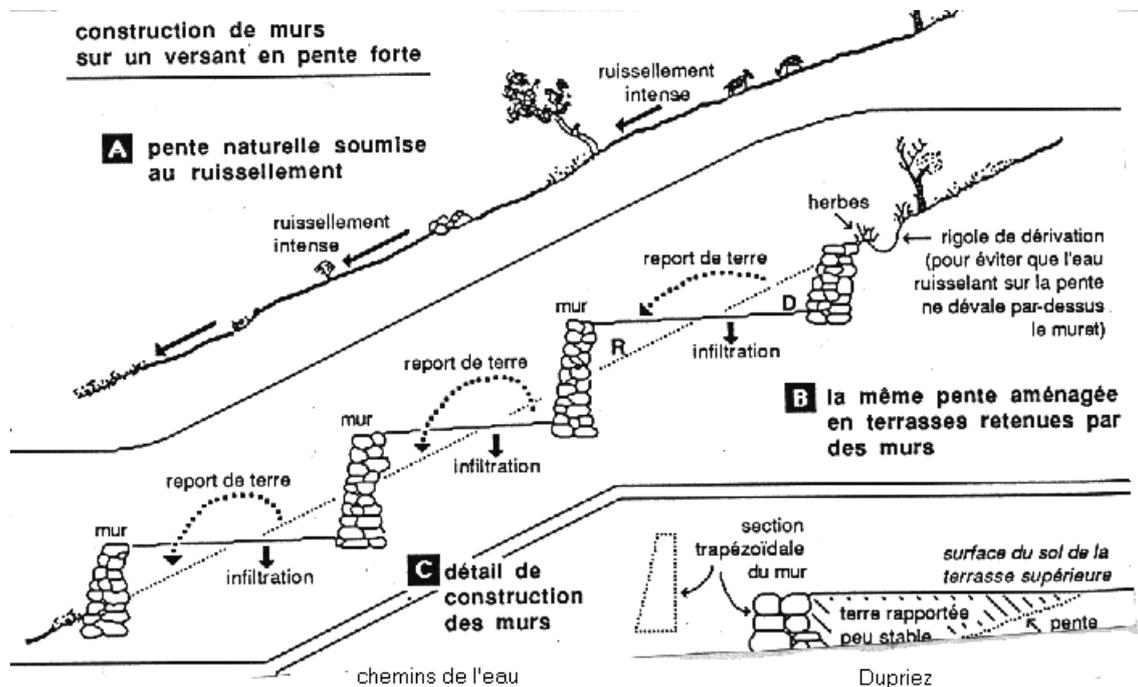
### 44. 3 Combat à l'origine du ruissellement

Plus le flux d'eau ruisselante est important, et plus l'énergie cinétique qu'il développe, augmente la capacité érosive. Donc il faut combattre le ruissellement dès son origine et non en aval.

### 44. 4 Canalisation de l'eau ruisselante

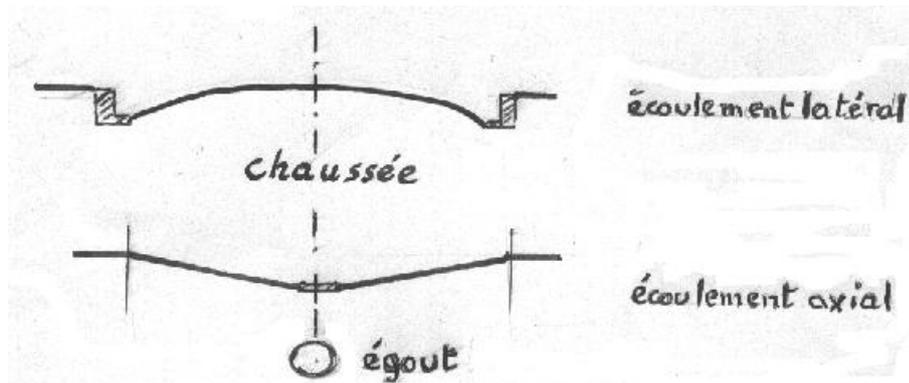
#### 444. 1 Zone rurale

Si en terrain plat, il s'avère aisé de creuser des fossés de drainage qui dirigeront l'eau de pluie vers l'exutoire naturel (cours d'eau, lac, mer) sur les versants à pente accentuée il convient d'aménager des terrains.



Voir schéma supra  
**444. 2 Zone urbaine**

Les eaux météoriques tombant sur une surface imperméabilisée, chaussées, trottoirs, ruissellent dans le caniveau, par une grille, rejoignent l'égout pluvial enterré ou bien par une saignée, rejoignent un fossé à ciel ouvert, à moins qu'elles ne soient dirigées sur des bassins d'infiltration, si tant est que bassin d'infiltration il y ait.



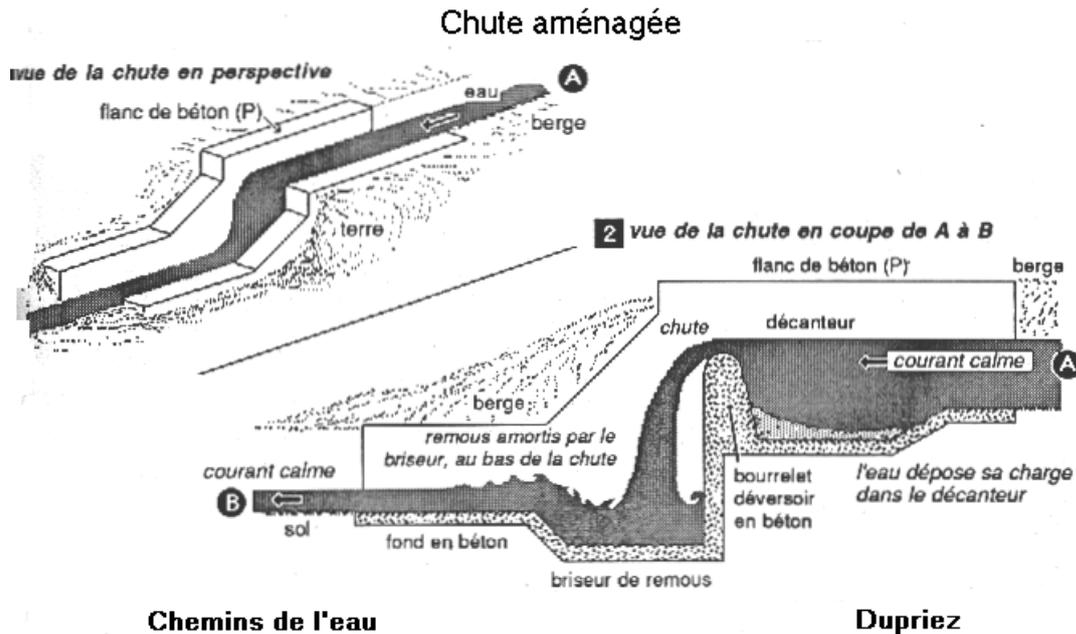
#### 44.5 Capture du débit solide de l'eau

Il faut donc **ralentir** l'eau afin que, par décantation, elle laisse sa charge.

L'on dispose de plusieurs moyens :

- filtrer l'eau dans des sables ou des galets
- réduire la pente
- barrer le passage de l'eau

Ce dernier procédé se pratique en créant une chute  
cf. schéma infra



#### 44. 6 Stratégie globale antiérosive

Pour un bassin-versant à pentes abruptes, à qui doit-on donner la priorité ?  
à la lutte dans le ravin ?

ou à l'aménagement des versants ?

Soit un bassin-versant de 30 hectares recevant 400 mm de pluies annuelles ; les 300 000 m<sup>2</sup> dudit bassin s'étendent sur 860 mètres de long et 350 m de large. Avec le même crédit, on pourrait :

- récupérer 2 hectares de terre dans le ravin, lesquels verront s'infiltrer les 400 mm tombés sur place et 1000 mm provenant des versants
- ou accroître le taux d'infiltration sur l'ensemble de la surface de 20 à 70 % par des aménagements ad hoc et des plantations.

☐ Rappel : 1 mm d'eau sur 1 ha = 10 m<sup>3</sup>

1 mm d'eau sur 1 m<sup>2</sup> = 1 litre

##### • 446.1 Bassin-versant non aménagé

Si l'on admet que le taux d'infiltration dans le sol = 20 %

quantité d'eau infiltrée  $400 \text{ mm} \cdot 10 \text{ m}^3 \cdot 30 \text{ ha} \cdot 0,2 = \underline{24\ 000 \text{ m}^3}$

quantité d'eau quittant le bassin-versant par ruissellement  $400 \text{ mm} \cdot 10 \text{ m}^3 \cdot 30 \text{ ha} \cdot 0,8 = 96\ 000 \text{ m}^3$

##### • 446. 2 Bassin-versant aménagé en récupérant 2 hectares dans le ravin

Sur ces deux hectares on pourra infiltrer 400 mm de pluie et 1 000 mm provenant des flancs du ravin soit 1400 mm

quantité d'eau infiltrée sur 2 ha :  $1\ 400 \text{ mm} \cdot 10 \text{ m}^3 \cdot 2 \text{ ha} = 28\ 000 \text{ m}^3$

quantité d'eau infiltrée (20 %) sur le reste :  $400 \text{ mm} \cdot 10 \text{ m}^3 \cdot 28 \text{ ha} \cdot 0,2 = \underline{22\ 400 \text{ m}^3}$

eau infiltrée **50 400 m<sup>3</sup>**

eau quittant le bassin par ruissellement :  $400 \text{ mm} \cdot 10 \text{ m}^3 \cdot 28 \text{ ha} \cdot 0,8 = 89\ 600 \text{ m}^3$

##### • 446. 3 Bassin-versant aménagé en réalisant ouvrages et plantations sur les flancs

en ce cas 70 % de l'eau tombée s'infiltrent

quantité d'eau infiltrée sur 30 ha :  $400 \text{ mm} \cdot 10 \text{ m}^3 \cdot 30 \text{ ha} \cdot 0,7 = \underline{84\ 000 \text{ m}^3}$

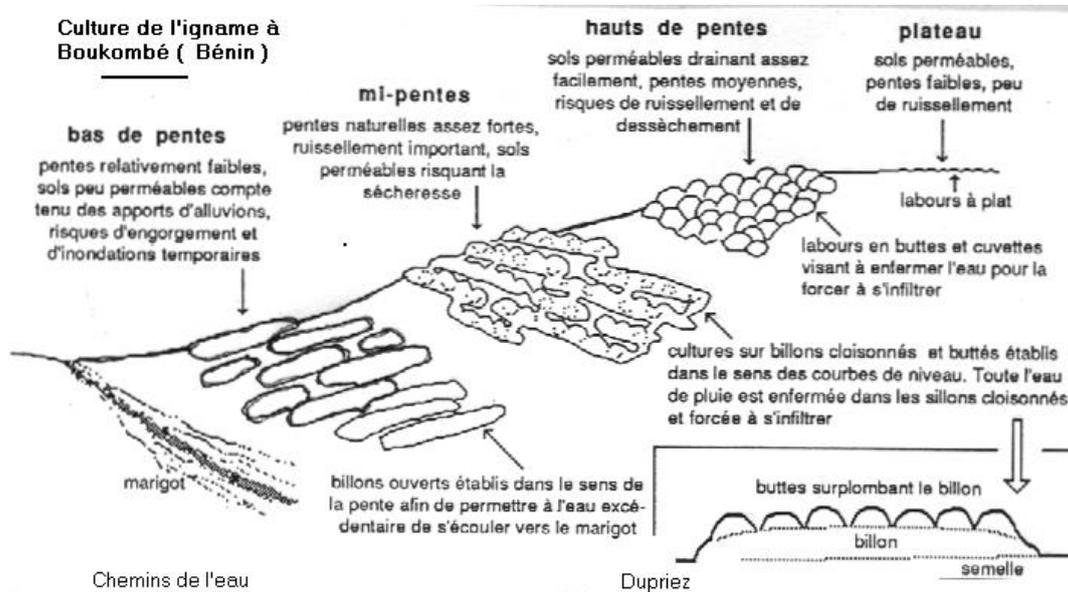
eau quittant le bassin par ruissellement :  $400 \text{ mm} \cdot 10 \text{ m}^3 \cdot 30 \text{ ha} \cdot 0,3 = 36\ 000 \text{ m}^3$

## 45 Pratique anti-érosive en zone rurale

Prenons un exemple africain : le relief du terroir de Boukombé au Bénin est légèrement vallonné ; on y cultive l'igname sur des buttes ou billons.

A mi-pente, les billons placés perpendiculairement à la pente, sont cloisonnés de façon à emprisonner l'eau de pluie.

Dans les bas-fonds, l'excès d'eau pouvant devenir nuisible aux cultures, les buttes ou billons sont placés dans le sens de la pente. cf. schéma *infra*



## 46 Gestion écologique (anti-érosive) en zone urbaine

### 46.1 Situation précédente

En Allemagne, dans la Ruhr s'écoule une rivière appelée Emscher, affluent du Rhin, qui traverse une région devenue minière à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Cf. carte *infra*



Il s'en est ensuivi la disparition des rigoles, des fossés remplacés par des canaux bétonnés recevant aussi les eaux usées, le tout orchestré à partir de 1899 par l'Emschergenossenschaft.

L'Emscher lui-même vit son lit bétonné. La population résidant sur son bassin-versant s'élève à 5 millions d'âmes.

En **accéléralnt le ruissellement** cela conduit à augmenter le débit des crues. Aussi, depuis 1994, l'*Emschergenossenschaft* a modifié sa politique.

#### 46.2 Evolution du système

*Was man liebt, asphaltiert man nicht*<sup>107</sup>

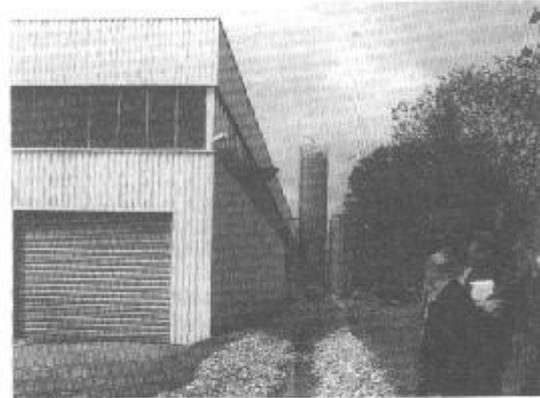
D'abord, il a été construit des égouts spécifiques pour recevoir les eaux usées, et ils ont opté pour un traitement décentralisé des eaux de pluie ; cela a conduit à

- **des tranchées d'infiltration,**  
aussi bien

dans les zones résidentielles

que dans les zones industrielles,

cf. photographie ci-contre.



Novatech '01

Frau Raasch

- la **construction de canaux** (300 km) parallèles aux anciens, pour recevoir les eaux pluviales.

- l'**installation de stations de décantation** ( 250 ) desdites eaux pluviales avant rejet dans l'Emscher.

#### 46.3 Situation actuelle

Cette évolution étant programmée sur 30 ans, l'*Emschergenossenschaft* verse 3 € de subvention par m<sup>2</sup> de surface déconnectée du système ancien.

A ce jour, 900 000 m<sup>2</sup> (90 ha) ont déjà été déconnectés. L'on devrait arriver à déconnecter 10 % de la surface du bassin-versant .

Cela signifie que l'**infiltration** sur le bassin-versant **augmentera sensiblement** et, partant, la nappe phréatique verra son niveau augmenter.

Il devrait s'en ensuivre non seulement une baisse des crues, mais un étiage moins accentué, les ruisseaux ne devraient plus être à sec les mois d'été.

<sup>107</sup> ce qu'on aime, on ne l'asphalte pas. Frau Raasch

## 5 Modifications des flux des cours d'eau

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, il fut établi de nombreux barrages destinés à la production d'électricité par turbine. L'on fut donc conduit à pratiquer des **prélèvements** par un canal, sur les fleuves, dans le dessein d'alimenter les turbines, ce qui entraîna la **restitution** dans le tronçon ainsi court-circuité, d'un débit réservé ou débit minimal fondé sur des considérations potamiques mais aussi de nature biologique.

### **Exemple : débit minimal induit par la chute de Chautagne**

51 Situation et caractéristiquetechniques

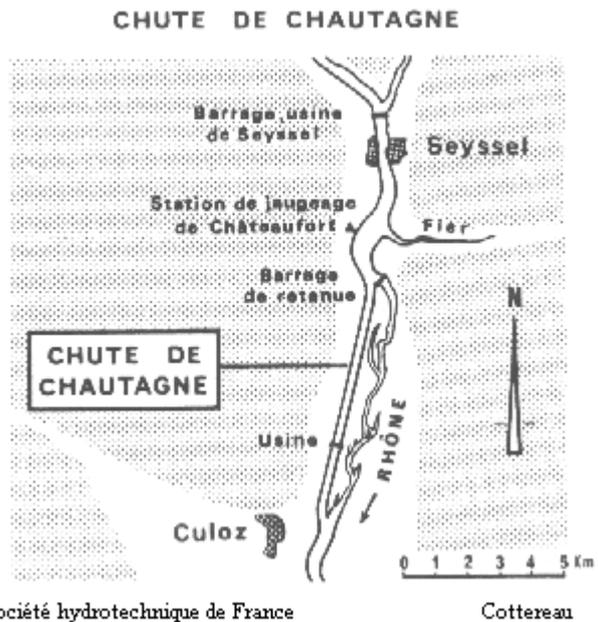
La chute de Chautagne fut aménagée selon les dispositions communes à toutes les chutes du Haut-Rhône.

cf. plan ci-contre

Elle compte donc

- **Un barrage à vannes mobiles** qui relève le niveau du Rhône et crée vers l'amont une retenue dans le lit du fleuve,
- **Un canal de dérivation** se développant dans la plaine alluviale de la rive droite du Rhône et dont voici les dimensions

canal d'aménée	5,4 km
canal de fuite	<u>3,1 km</u>
Σ	8,5 km



- **Une usine hydroélectrique** implantée sur la dérivation équipée de 2 groupes bulbes de 45 MW pouvant absorber 350 m<sup>3</sup>/s et d'une production annuelle moyenne de 435 Gwh.

L'on voit que le débit d'équipement de l'usine (700 m<sup>3</sup>/s) se trouve dépassé en moyenne 30 jours/an.

- **Débit du Rhône court-circuité** Le Cahier des charges de l'aménagement fixe le débit réservé à maintenir dans le tronçon du Rhône court-circuité dont la longueur atteint 9 km, aux valeurs suivantes :

Janv.	10 m <sup>3</sup> /s	Avril	10	Juillet	20	Oct	20
Fév.	10	Mai	10	Août	20	Nov	20
Mars	10	Juin	20	sept.	20	Déc.	10

insi le débit réservé dans le tronçon du Rhône court-circuité par l'aménagement représente-t-il les fractions infra du débit moyen (**Module**) :

mensuel maximum	.....	1/20 <sup>ème</sup>
mensuel minimum	.....	1/40 <sup>ème</sup>
annuel moyen	.....	1/27 <sup>ème</sup>

## 52 Caractéristiques potamiques du Rhône à l'amont

Le régime du Haut-Rhône se présente essentiellement comme nival et glaciaire avec un fort étiage hivernal.

L'hydrologie du Haut-Rhône dans la région concernée par le chute de Chautagne peut être caractérisée par les débits suivants :

étiage absolu	.....	90 m <sup>3</sup> /s
étiage conventionnel dépassé en moyenne 355 jours/an	.....	160 m <sup>3</sup> /s
débit semi-permanent	.....	350 m <sup>3</sup> /s
débit dépassé 10 jours/an (PHEN)	.....	860 m <sup>3</sup> /s
débit moyen (module)	.....	400 m <sup>3</sup> /s

## 53 Caractéristiques potamiques du Rhône court-circuité

### 53.1 Morphologie du lit

Le lit mineur comporte parfois des bras latéraux plus ou moins stables et pérennes (**lônes**) mais le chenal principal reste nettement prépondérant dans ce secteur.

Les rives du fleuve présentent souvent, particulièrement en rive droite, des bancs de graviers et galets en pente douce ; la granulométrie reste assez grossière du fait d'UNE PART de la forte pente et de la vitesse du courant d'AUTRE PART.

La largeur du lit, variable le long du tronçon étudié, reste toujours importante du fait de l'absence de ramification du chenal :

en moyenne 160 mètres au débit semi-permanent

100 mètres à l'étiage

Parallèlement la profondeur demeure relativement faible :

en moyenne 1,60 mètre au débit semi-permanent

1,30 mètre à l'étiage

La surface du plan d'eau varie ainsi :

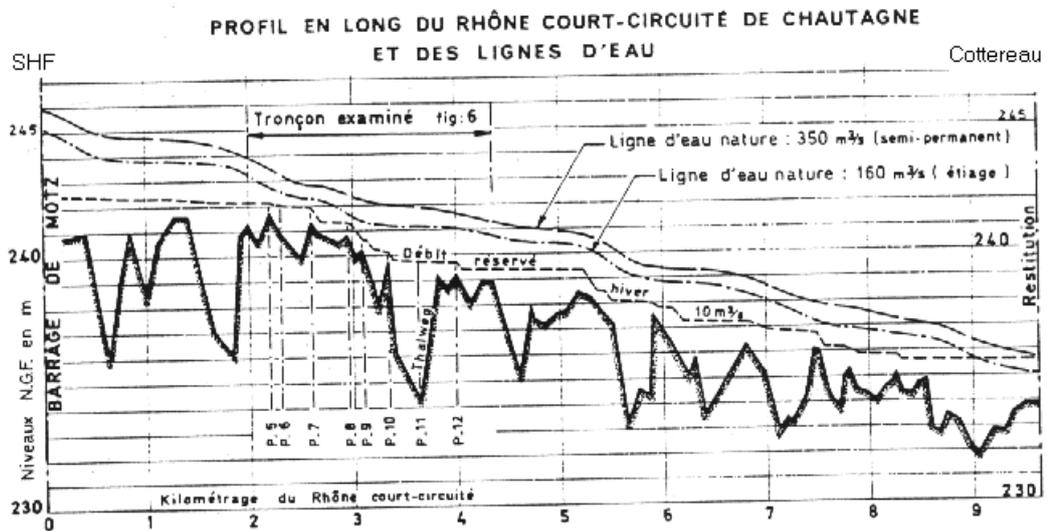
en moyenne 145 ha au débit semi-permanent

100 ha à l'étiage

### 53. 2 Niveaux et pentes des lignes d'eau

La figure infra montre l'allure du profil en long des lignes d'eau d'étiage et de débit semi-permanent du Rhône ainsi que celle des fonds du lit mineur, cette dernière en traits épais.

Elle indique aussi la ligne d'eau avec le débit réservé d'hiver de  $10 \text{ m}^3 / \text{s}$



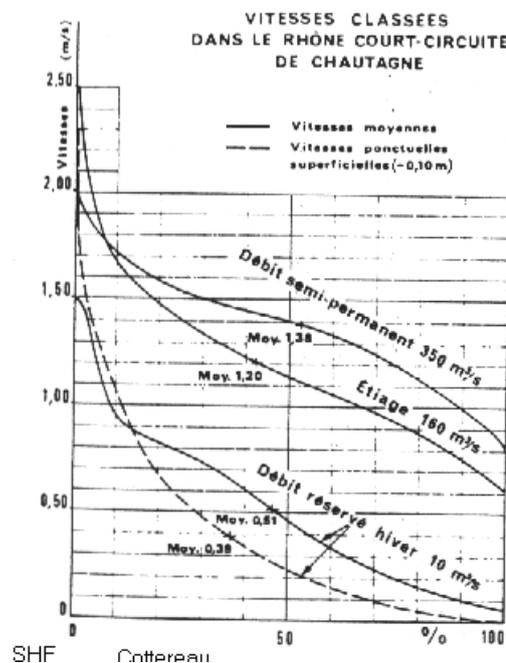
On observe d'ailleurs que ces fonds se modifient fréquemment, provoquant un déplacement des zones à fortes vitesses et des zones calmes d'UNE PART et une instabilité dans le détail des lignes d'eau d'AUTRE PART.

### 53. 3 Vitesses d'écoulement

Pour les débits d'étiage et semi-permanents, les vitesses moyennes pour le Rhône court-circuité sont représentées sur le graphique ci - contre

Notons que :  
par rapport à ces vitesses moyennes d'écoulement dans la section mouillée,  
les vitesses observées ponctuellement en surface comme en profondeur, peuvent

- présenter des écarts importants de 1 à 3 dans les zones à fort courant



- et tendre vers 0 dans les eaux calmes.

## 54 Caractéristiques biologiques

Si l'aspect physico-chimique de l'eau n'a pas été modifié par le court-circuit, par contre les caractéristiques biologiques ont évolué.

### 54. 1 Macrofaune benthique<sup>108</sup>

On la mesure en empilant des pierres plates dans des paniers immergés pendant 3 à 6 semaines dans le lit. Le nombre de taxons ( ou espèces ) atteint 55, avec une diversité (dite de Shannon) variant de 2 à 5' selon les débits.

### 54. 2 Ichtyofaune<sup>109</sup>

Elle est représentée par le poisson blanc (cyprinidés rhéophiles) du type barbeau à 93 %. Elle se mesure par l'échantillonnage d'abondance.

Sa biomasse peut être estimée à 330 kg/ha environ

## 55 Evolution suite à la création de la chute

### 5.1 Caractéristiques potamologiques

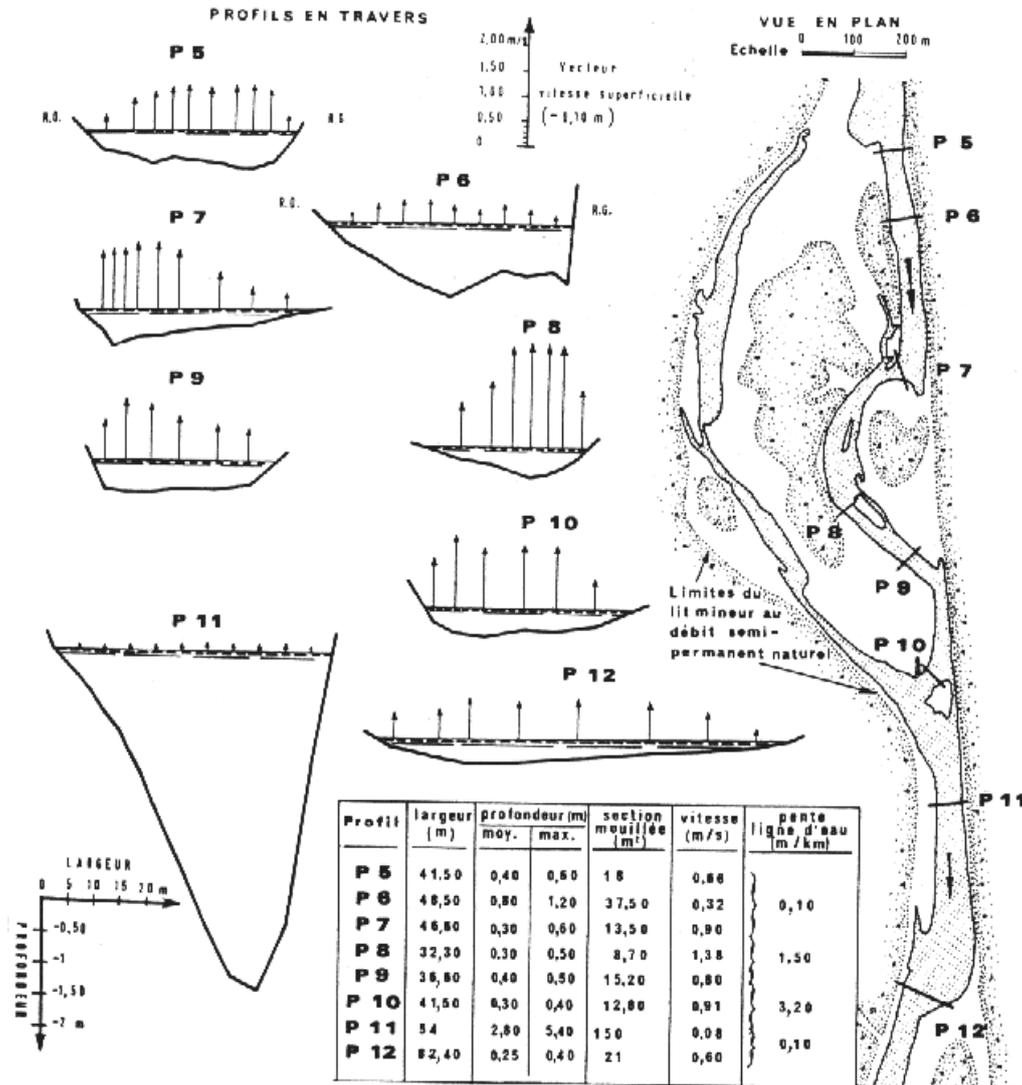
Dans la figure infra sont résumées :

les sections mouillées – les pentes et les vitesses pour un débit réservé de .... 10 m<sup>3</sup>/s

---

<sup>108</sup>το βένθος : la profondeur

<sup>109</sup>ο ίχθυς : le poisson



Vue en plan et profils en travers au débit réservé d'hiver (10 m<sup>3</sup>/s), d'un tronçon du Rhône court-circuité de Chautagne.

SHF

Cottureau

L'on note la constitution d'un bras secondaire ouvert sur l'aval.

### 55.2 Caractéristiques biologiques

En une première étape la faune benthique a périclité puis a réoccupé les lieux. Pour l'ichtyofaune, il a été noté une augmentation de la densité.

## 6 Quelques aménagements fluviaux ...

### 61 Méthode des aménagements à courant libre

#### 61.1 Observations

Elles fournissent les évolutions des formes des cours d'eau ce qui implique la possession de cartes.

Il faut effectuer des sondages du fond, l'on obtient des profils en travers espacés de 10 mètres environ.

## 61. 2 Modèles réduits

Bien souvent les observations ne suffisent pas ; on construit des modèles réduits fondés sur la similitude dynamique de Froude.

### 612. 1 Définition de la similitude dynamique

Deux mouvements  $M_1$  et  $M_2$  sont semblables s'ils ont lieu sur des trajectoires géométriquement semblables et si pour deux points homologues il existe des rapports déterminés entre les caractéristiques.

### 612. 2 Théorie de la similitude

Soit un mouvement réel  $M_1$  ( rivière )

Imaginons un mouvement  $M_2$  ( modèle réduit ) en multipliant :

les longueurs  $L$  par  $\lambda \rightarrow L \cdot \lambda$

les masses spécifiques  $\rho$  par  $m \rightarrow \rho \cdot m$

le temps  $t$  par  $\theta \rightarrow t \cdot \theta$

la pression  $p$  par  $\alpha \rightarrow p \cdot \alpha$

Le mouvement est-il possible ?

OUI , à condition de satisfaire les équations de continuité qui se traduisent par :

$$\alpha = m \cdot \lambda \quad \text{et} \quad \theta = \sqrt{\lambda}$$

Donc si on se donne  $\lambda$  coefficient des longueurs et  $m$  coefficient des masses spécifiques, l'on a déterminé le modèle réduit d'un barrage

$$\lambda \text{ et } m \text{ connus} \quad \alpha ? \quad \theta ?$$

entre ces deux inconnues une seule relation, citée supra, permet de déterminer les quantités, voir croquis infra



Il faut que le pourcentage des forces appliquées reste le même dans la similitude.

En pratique on réalise la similitude pour un facteur considéré ; exemple : pesanteur, et pour le reste on reste dans l'à peu près.

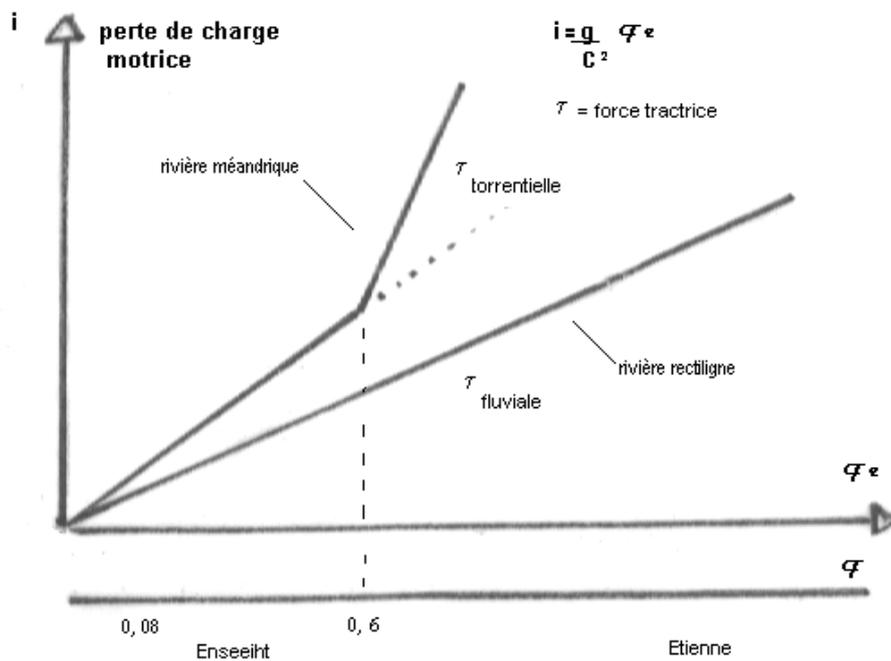
- Rappel sur le nombre de Froude

Il s'agit d'un nombre sans dimension  $[F] = 0$ , comme le nombre de Reynolds, la vitesse  $u$  figure au numérateur, il indique **l'influence de la pesanteur sur l'écoulement**

$$F^2 = \frac{u^2}{g R} \quad R : \text{ rayon hydraulique de la rivière}$$

Ce nombre indique aussi l'érosion par la force tractrice des berges (frottement) On sait que  $\tau = \rho g R i$

avec  $u^2 = C^2 Ri$  il vient  $i = g F^2 / C^2$  voir graphique *infra*



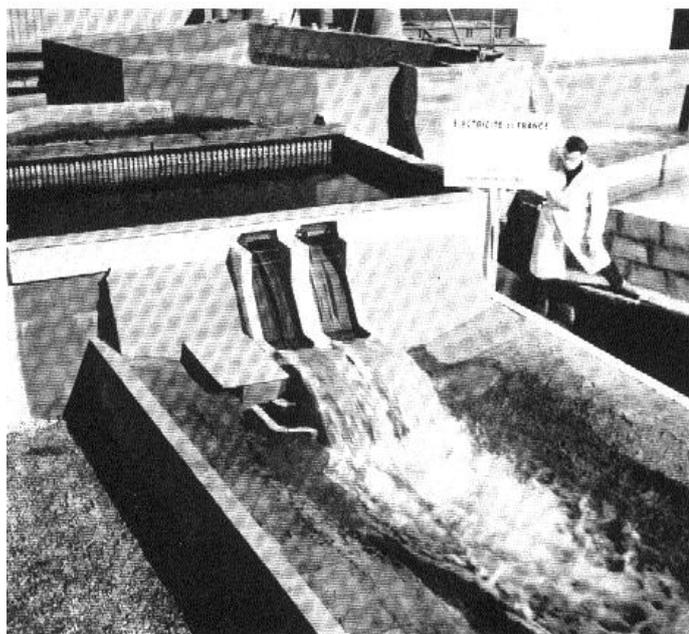
Si  $F > 0,6$  la perte de charge augmente très vite entraînant l'érosion des berges pour que  $F$  baisse  
Il faut  $F < 0,6$  pour éviter l'érosion des berges et du fond.

•Application à la similitude <sup>110</sup>

Soit  $H$  la charge motrice en  $M_1$   
 $H = f(Q, a, \rho, g)$   $a$  : largeur  
Soit  $H^*$  la charge motrice réduite en  $M_2$   
 $H^* = f(F, H)$

Les constructions de modèles réduits est fondée sur la similitude dynamique de Froude

Cf. photographie ci-contre  
Barrage du Raviège sur l'Agout  
établi au Banlève par l'Enseeiht  
échelle 1 / 40 ème



612. 3 Application des modèles réduits en rivière

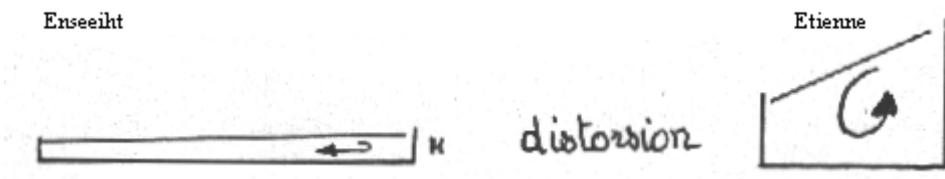
•Turbulence

Pour disposer d'une turbulence suffisante donc d'un nombre de Reynolds de 12 000, on introduit une différence d'échelle entre les dimensions verticales et horizontales de l'ordre de 1 à 10.

110

Si viscosité, la similitude ne peut s'appliquer

voir croquis infra



Il existe des courants transversaux dans les méandres dus à une pente latérale et très difficiles à représenter en modèle.

• **Rugosité**

Le modèle doit être plus rugueux que la nature

(1)  $u = c \sqrt{R} i$  Chézy

(2)  $\underline{u}_2 = \lambda \cdot \theta^{-1} = \sqrt{\lambda}$  similitude longueur/temps

$\frac{u_1}{u_2}$   
 car  $\theta = \sqrt{\lambda}$  posons  $\lambda = 1 / 100$

(3)  $c = \frac{u_1}{\sqrt{R} i}$  D : distorsion 1 / 20

$\sqrt{R} i \quad \sqrt{D}$

$R \# H$

$c$  : coefficient de rugosité du modèle =  $\sqrt{1 / 100} / \sqrt{1 / 20} = 0,45$

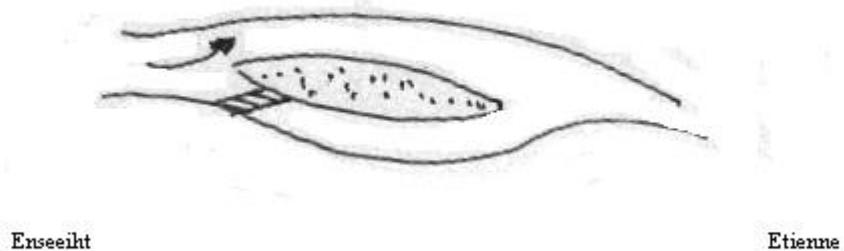
• **Débit solide**

On effectue une crue dans le modèle. Si le dépôt s'avère supérieur à la réalité en respectant l'échelle de temps  $\lambda / u$ , c'est que la crue modèle doit durer moins longtemps que la crue naturelle. Donc le modèle doit rester proportionnel à  $\lambda / \sqrt{u}$

62 Aménagements

62.1 Choix d'un bras

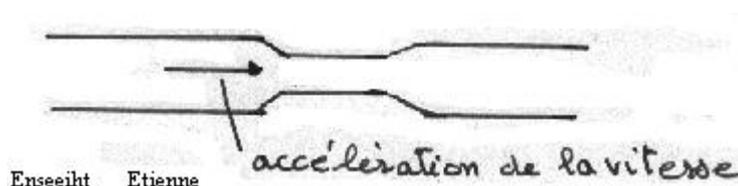
cf. croquis ci-contre

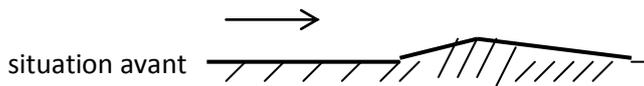


**62. 2 Seuil**

Si on drague le seuil, il se reformera ; il vaut mieux augmenter la vitesse en diminuant la largeur.

Cf. croquis infra





Si un ruisseau amène un cône de déjection dans la rivière, il suffit de draguer.

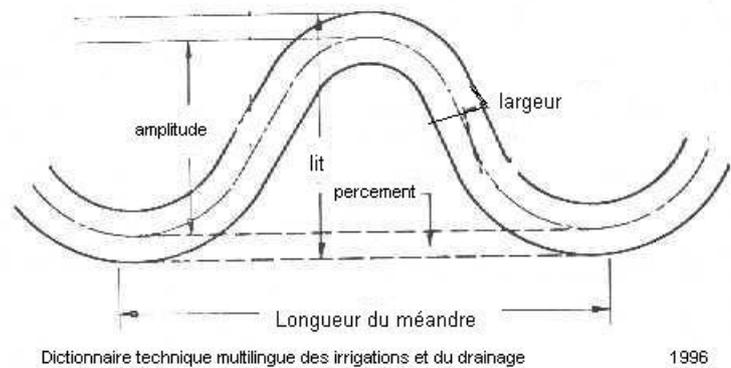
### 62. 3 Forme d'un méandre d'équilibre

Le courant divague amenant des méandres. Quand le méandre a atteint l'équilibre, il existe un rapport entre sa longueur et la largeur du fleuve

Longueur = 8 fois la largeur

voir croquis ci-contre

Selon que l'on se trouve avec des matériaux grossiers ou argileux la profondeur varie, les rivières argileuses sont les plus profondes



Dictionnaire technique multilingue des irrigations et du drainage

1996

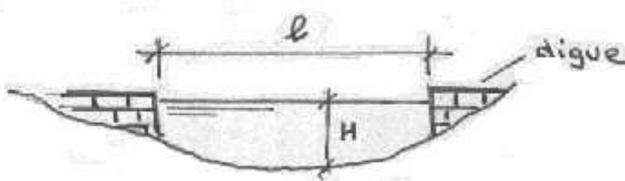
### 62. 4 Normalisation des profils en travers

$$Q = u \cdot \omega$$

$$u = c \sqrt{R i}$$

Si on veut réaliser un mouillage H de 2 mètres de fond pour un débit donné Q, l'on définit un rayon hydraulique R

$$\omega = l \cdot H$$



Enseeiht

Etienne

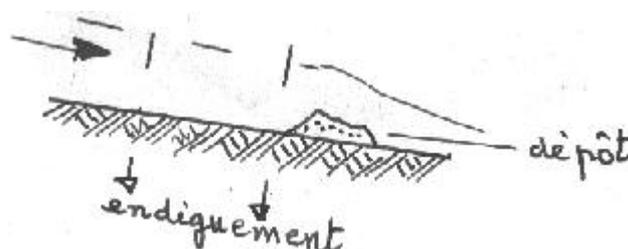
On en déduit une largeur  $l <$  largeur naturelle et on construit des digues pour resserrer le lit

cf. croquis ci-contre

### MAIS

**d'une part** la force tractrice (contrainte de frottement)  $\tau = \rho g R i$  va entrer en action et créer un dépôt d'alluvions an aval des digues

cf. croquis ci-contre

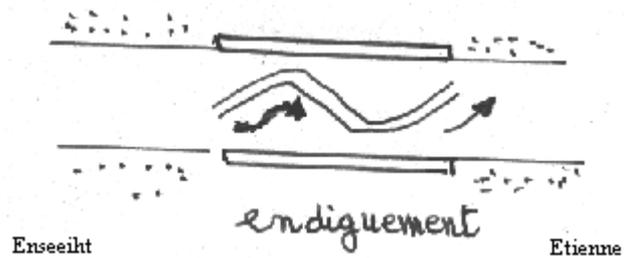


Enseeiht

Etienne

d'autre part le courant va tracer des sinuosités en travers d'une digue à l'autre

cf. figure ci-contre

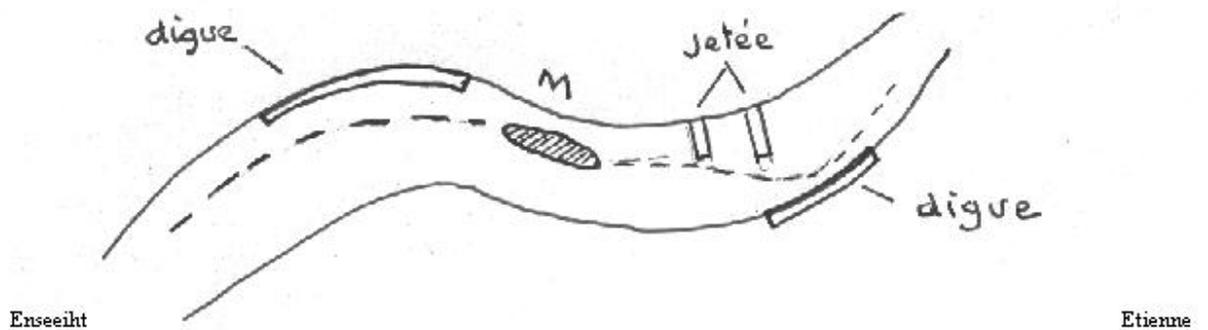


### 62.5 Régularisation des pentes

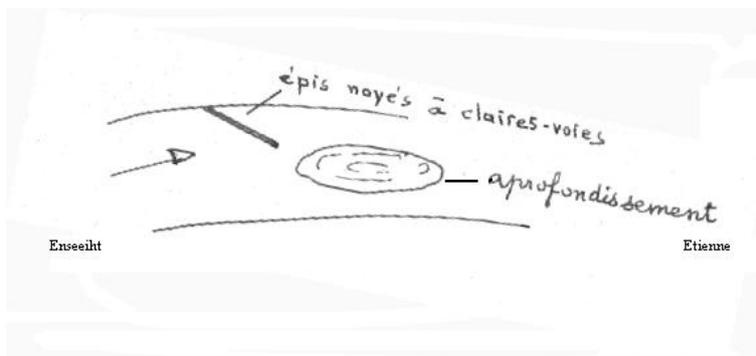
Dans le dessein de **fixer les mouilles et les seuils** et pour obtenir une mouille M l'on crée une digue dont la courbure  $c$  est liée à la profondeur  $h$  par la loi de Fargue  $\frac{dc}{ds} = a \frac{dh}{ds}$

On peut mettre des jetées pour déporter le flot

cf.  
 figure ci-contre



Pour **approfondir** l'on emploie des épis noyés ( non per... )



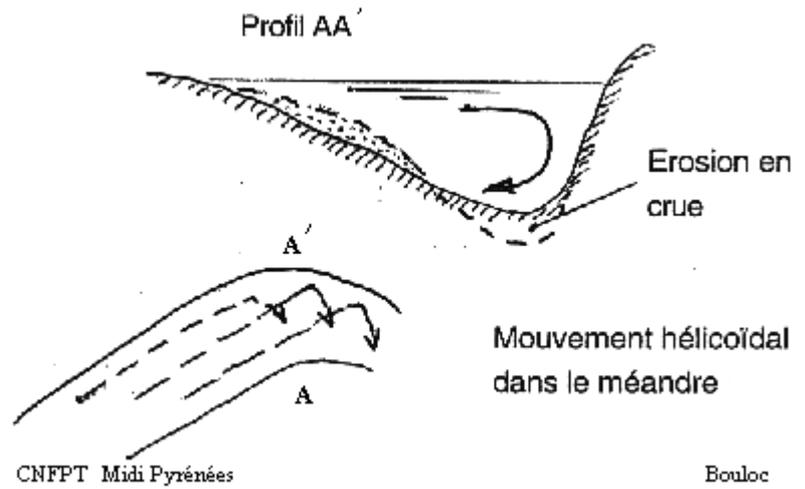
En régime de  
 " " place à  
 issement  
 a l'amont  
 En régime de  
 de suspension c'est le contraire.

cf. croquis ci-contre

Les courants de surface plongent dans le méandre et créent une fosse au pied de la berge concave

Pour créer de tels courants de fond hélicoïdaux, on utilise des panneaux de surface maintenus par des flotteurs qui déportent le courant, amènent un écoulement hélicoïdal sur le fond, et le creusent créant une mouille.

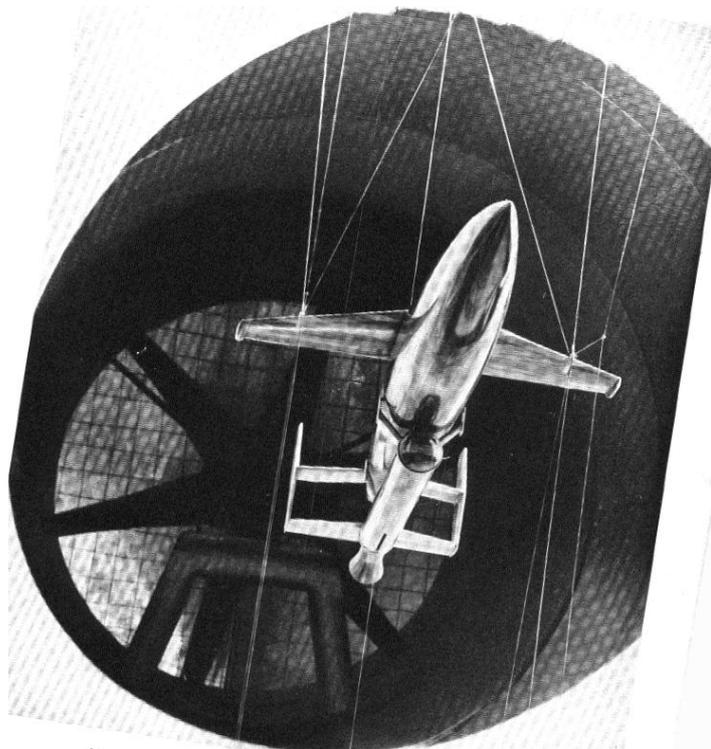
cf. croquis ci-contre



### N.B. Application aéronautique de la similitude dynamique des fluides

Ci-contre maquette d'avion suspendue dans la soufflerie aérodynamique.

Elle est calculée selon la similitude dynamique de Froude



## Les écosystèmes aquatiques

## **1 Les critères des écosystèmes**

- 11 Définition**
- 12 Signification énergétique d'un écosystème**
- 13 Le réseau trophique**
- 14 Notion de physiologie microbienne des bio-réducteurs**

## **2 Les eaux dormantes**

- 21 Définition**
- 22 Types**
- 23 Critères physico-chimiques**
- 24 Evolution et valeur**
- 25 Impact sur le traitement des eaux d'égout**

## **3 Les eaux courantes**

- 31 Définition**
- 32 Types**
- 33 Critères potamologiques**
- 34 Critère thermique**
- 35 Fonctionnement des écosystèmes**
- 36 Chaîne trophique et flux d'énergie**
- 37 Impact sur le traitement des eaux d'égout**

## **4 Le cycle de l'azote**

- 41 La représentation schématique**
- 42 La fixation par les producteurs**
- 43 L'utilisation par les consommateurs**
- 44 La transformation en N minéral par les bio-réducteurs**
- 45 La dénitrification**
- 46 Impact de ce cycle sur l'environnement**

## **5 Le cycle du phosphore**

- 51 La représentation schématique**
- 52 Origine du phosphore**
- 53 Utilisation par les consommateurs**
- 54 Transformation en P minéral par les bio-réducteurs**
- 55 Impact de ce cycle sur l'environnement**

# 1 Les critères des écosystèmes

“ Naturae nisi parendo non imperatur ” sir F. Bacon<sup>111</sup> (1561-1626)

## 11 Définitions

Les êtres vivants cohabitent grâce à un réseau d'interactions. Un groupement d'organismes..... " rassemblés par l'attraction due aux divers facteurs du milieu..." constitue une **BIOCENOSE**.<sup>112</sup>

Ce groupement est caractérisé par une composition définie et occupe un espace déterminé appelé **BIOTOPE**<sup>113</sup>

biotope + biocénose = ECOSYSTEME

### 11. 1 Exemple :

A Fontainebleau (importante forêt proche de Paris) l'écosystème " Forêt " devient l'addition :

d'un biotope " chênaie sèche " sur sols gréseux,

ET d'une biocénose à base de sangliers dévorant les glands, de vipères mangeant les rats, etc.....

### 11. 2 Etude des interactions

Celles qui se développent au sein des écosystèmes peuvent définir l'ÉCOLOGIE<sup>114</sup> lorsque la finalité de ce travail reste la compréhension d'une économie et d'une sociologie de la nature.

### 11. 3 Les facteurs

Ceux qui règlent les conditions du milieu dont dépend toute espèce peuvent se classer en : abiotiques, essentiellement des paramètres physico-chimiques  
biotiques, qui restent liés aux êtres vivants.

## 12 Signification énergétique d'un écosystème

Toute espèce vivante animale ou végétale a besoin d'**énergie** pour, à partir de certaines matières, fabriquer ses cellules, donc vivre.

L'on classe les espèces d'un écosystème selon qu'ils sont :

### 12. 1 Les producteurs

Ils peuvent capter une forme d'énergie NON liée aux vivants pour la transformer en matière organique composant leurs cellules.

**exemple** : l'arbre qui utilise l'énergie lumineuse pour constituer sa matière organique ; il s'agit de phénomène de photosynthèse.

### 12. 2 Les consommateurs

Ils doivent obtenir l'énergie nécessaire à leur métabolisme en consommant les producteurs précédents.

**exemple** : le cheval qui mange les feuilles de l'arbre pour en tirer l'énergie nécessaire à sa vie ; les microorganismes **BIOREDUCTEURS** qui transforment la matière organique en éléments minéraux et qui feront l'objet d'un développement *infra*.

<sup>111</sup> On ne peut commander la nature qu'en lui obéissant

<sup>112</sup> ο βίος : la vie et η ένωση : l'union

<sup>113</sup> ο τόπος : le lieu

<sup>114</sup> ο οίκος : la maison et ο λόγος : le discours

### 13 La vie au sein d'un écosystème

Chaque espèce d'un écosystème occupe donc une séquence ordonnée de façon que chacune soit **DEPENDANTE** de la précédente.

**exemple** : l'herbe est semée par l'homme, le cheval mange l'herbe, l'homme mange le cheval.

Une suite de ces séquences constitue une chaîne TROPHIQUE<sup>115</sup> ou alimentaire. Ces diverses chaînes se trouvent connectées et constituent un réseau trophique, où chaque séquence est remplacée par un niveau, le premier demeurant celui des producteurs.

Ainsi l'écosystème s'organise de façon à assurer le FLUX D'ENERGIE nécessaire au maintien de la vie des espèces concernées. Mais celles-ci nécessitent pour la synthèse des matières organiques qui les composent, d'ELEMENTS MINERAUX tels que : le carbone, l'azote.....sans oublier l'eau.

### 14 Notions de physiologie<sup>116</sup> microbienne

#### 14.1 Les matières premières

Elles sont capturées au sein de l'écosystème

**exemple** : l'arbre se nourrit au moyen des racines qui dans le sol, absorbent  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $SO_4^{--}$

.....

#### 14.2 L'apport d'énergie

Selon sa physiologie propre, l'être **végétal** peut utiliser :

soit la LUMIERE, grâce à la photosynthèse (cas de végétaux dits supérieurs)

soit des réactions d'OXYDO-REDUCTION ; chacune de celles-ci se trouvant caractérisée par un transfert d'électrons d'un corps qui joue le rôle de réducteur à un accepteur appelé **oxydant**. Trois cas se présentent (pour ces végétaux dits inférieurs).

##### 142.1 La fermentation :

L'oxydant est composé de matières ORGANIQUES ; ainsi

oxydant	organisme végétal réducteur	déchet obtenu
raisin	levure	$CH_3 - CH_2 - OH$ et $CO_2$
vin	Champignon ( <i>mycoderma aceti</i> ) <sup>117</sup>	$CH_3 - COOH$
lait	bactérie lactique	$CH_3 - CHOH - COOH$
beurre	bactérie butyrique	$CH_3 - CH_2 - CH_2 - COOH$

Le processus chimique s'effectue

éthanol :  $CH_3 - CH_2 - OH$

propanol :  $CH_3 - CH_2 - CH_2 - OH$

ainsi

$CH_3 - [COOH]$ acide acétique

$CH_3 - CH_2 - [COOH]$ acide propionique

$CH_3 - CHOH - [COOH]$  acide lactique

butanol :  $CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - OH$

$CH_3 - CH_2 - CH_2 - [COOH]$ acide butyrique

##### 142.2 La respiration aérobie :

L'oxydant est ici, l'OXYGENE ; par exemple

Oxydant	organisme végétal réducteur	déchet obtenu
$O_2$ + ammoniac	nitrosomonas	$CO_2$ et $OH_2$
$O_2$ + nitrite	nitrobacter	$CO_2$ et $OH_2$
$O_2$ + sulfure	beggiatoa	$CO_2$ et $OH_2$ (biolixiviation)
$O_2$ + fer	chlamydo bacteria	$CO_2$ et $OH_2$ ( $Fe^{++} \rightarrow Fe^{+++}$ )

<sup>115</sup> η τροφή : la nourriture

<sup>116</sup> η φύση : la nature

<sup>117</sup> ο μύκητας : le champignon et το δέρμα : la peau

Dans ce cas, le phénomène d'oxydation s'avère COMPLET. Rappelons que l'être humain oxyde le sang veineux avec l'oxygène de l'air et rejette du gaz carbonique et de l'eau.

Le procédé de BIOLIXIVIATION permet à la bactérie d'oxyder la chalcopryrite<sup>118</sup> (minerai de cuivre  $S_2Cu$ ) en sulfate (eau céleste,  $So_4Cu$ ) et d'en tirer Cu.

### 142. 3 La respiration anaérobie :

En l'absence d'oxygène ce dernier se trouve dans un composé minéral tel que : sulfate, nitrate, carbonate.

oxydant	organisme végétal réducteur	déchets obtenus
nitrate	bactéries hétérotrophes	$NH_4$ ou $N_2$
sulfates	sulfobactéries	$So_4^-$ $So_3^-$ $S_2$ $O_3$ (sesquioxyde) $SH_2$
carbonates	méthanobacterium	$CH_4$ et $CO_2$

### 14.3 Remarque terminologique

Ces organismes peuvent aussi se classer selon leur autotrophie ou leur hétérotrophie.

#### 143. 1 Un organisme autotrophe<sup>119</sup>

Vis-à-vis de **C** (par exemple des bactéries nitrifiantes) l'organisme autotrophe n'a pas besoin de carbone organique, car il utilise le  $CO_2$  de l'air atmosphérique.

#### 143. 2 Un organisme hétérotrophe<sup>120</sup>

Vis-à-vis de **C** (par exemple des bactéries dénitrifiantes) l'organisme hétérotrophe a besoin de carbone organique, car il vit en condition anaérobie donc sans contact avec l'air.

Lorsque le biotope EVOLUE et passe par exemple d'une situation aérobie à une situation anaérobie, les bactéries autotrophes disparaissent au profit des bactéries hétérotrophes.

<sup>118</sup> η χαλκίτη : le minerai de cuivre

<sup>119</sup> αυτός ,η,ο : soi-même

<sup>120</sup> έτερος ,α,ο : autre

## 2 Les eaux dormantes

*"C'était un grand pays de mares et d'étangs "  
" où l'eau dormante avait ce parfum d'inconnu "*

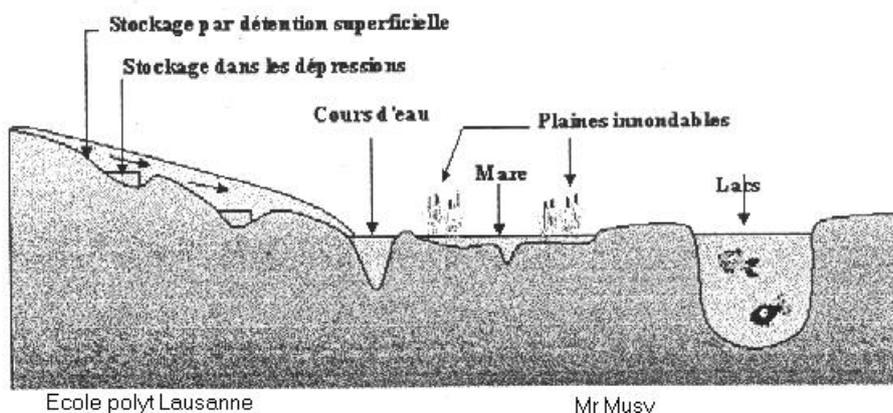
*Mulhauser*

### 21 Définition potamique

- L'eau dormante constitue un système dynamique caractérisé par un courant dont la vitesse est égale ou proche de zéro mètre par seconde et dont les forces hydrauliques mises en jeu sont trop faibles pour permettre le transport de particules vers l'aval.

- Les lacs, les étangs ou les plaines inondées sont des réservoirs naturels ou artificiels, le volume et la superficie pouvant être très importants. Ils interviennent directement dans le bilan hydrologique par les échanges d'eau avec le sol, en favorisant l'évaporation à leur surface ou encore en retardant l'écoulement en rivière par laminage.

cf. schéma infra



### 22 Types d'eau dormante

Le vocable « eau dormante » regroupe une infinité de termes qui ne sont pas toujours très explicites ; on en retiendra quatre.

#### 22.1 Lac

Etendue d'eau dormante intérieure qui possède en plus de sa zone littorale, une zone profonde privée de lumière où les espèces végétales ne peuvent se développer.

#### 22.2 Etang

Etendue d'eau dormante intérieure qui ne possède pas de zone profonde, mais dont le fond est parfois soustrait à l'action thermique du soleil.

#### 22.3 Mare

Etendue d'eau dormante intérieure qui ne possède pas de zone profonde et dont le fond n'est pas soustrait à l'action thermique du soleil.

## 22.4 Flaque

Etendue d'eau dormante intérieure temporaire.

## 23 Critères physico-chimiques

### 23.1 Densité – Température

La densité maximale de l'eau étant obtenue à 4° C il apparaît souvent en été, une stratification des eaux du lac en :

- une zone superficielle, épilimnion<sup>121</sup> avec  $T > 4^\circ$
- une zone profonde, hypolimnion<sup>122</sup> avec  $T \leq 4^\circ$  C°
- une zone intermédiaire

En automne et en hiver, la baisse de température extérieure influe sur celle des eaux superficielles donc sur leur densité. Il en résulte un brassage général qui conduit à une température uniforme, mais aussi à une **oxygenation** des eaux profondes et à une **minéralisation** des eaux superficielles.

### 23.2 Teneur en éléments nutritifs

Elle constitue un autre paramètre important ; l'on distingue ainsi :

- les lacs oligotrophes<sup>123</sup>, profonds, à eau limpide et peu d'aliments nutritifs
- les lacs eutrophes<sup>124</sup> aux eaux troubles riches en éléments nutritifs

#### 232.1 Chaîne trophique

Dans l'écosystème, les producteurs appartiennent au règne végétal (algues.....) ; les consommateurs primaires se recrutent chez les poissons, les crustacés ; les consommateurs secondaires sont représentés par les carnassiers (brochets). La mort de ces espèces fournit la nourriture à des décomposeurs (bactéries) qui assurent la minéralisation au fond du lac. Cf. schéma

*infra*

producteurs (algues)



consommateurs I

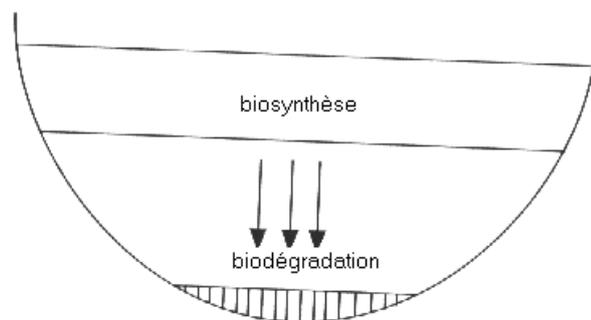
(crustacés - poissons herbivores)



consommateurs II (poissons carnivores)



bioréducteurs (bactéries)



Ecologie eau courante

Mr Anqelier

#### 232.2 Cas du phosphore

Sous la forme de phosphates  $[PO_4]_3^-$  consécutivement à la minéralisation par les bactéries des composés organiques phosphorés, leur excès entraîne la prolifération d'algues.

### 23.3 Rayonnement solaire

Il s'agit de la quantité d'énergie reçue à la surface du plan d'eau. Cette énergie est diffusée selon un angle solide

<sup>121</sup> επί = sur η λίμνη = l'étang

<sup>122</sup> ὑπο = sous

<sup>123</sup> ολίγο = peu η τροφή = la nourriture

<sup>124</sup> ευ = bien

$$d\omega = \frac{dS \sin h}{D^2} \text{ (surface } dS \text{ à distance } D \text{ du soleil)}$$

et est égale à  $q = c \sin h$

$h$  : hauteur du soleil sur l'horizon ;  $c$  : constante solaire  $f$  ( latitude, météorologie, durée ensoleillement.....)

Ainsi, si l'eau se réchauffe, la solubilité de l'oxygène et du gaz carbonique vont baisser. Les organismes devront donc ralentir leur activité.

#### 23. 4 pH

Il exprime l'acidité ,  $\text{pH} = \text{colog} [\text{H}^+]$  variable de 0 à 14. La disponibilité des ions  $[\text{H}^+]$  dans l'eau indique le pouvoir de dissolution de la matière organique dans l'eau.

lac oligotrophe  $\text{pH} < 6$  : acide

lac eutrophe  $> 7$  : alcalin

#### 23. 5 Salinité

Elle indique la concentration des corps chimiques qui, en solution dans l'eau, se dissocient en [ cations ]<sup>+</sup> et [ anions ]<sup>-</sup>

On trouvera surtout

$\text{Ca}^{++}[\text{CO}_3 \text{ H}]^-$  Bicarbonate

$\text{Mg}^{++}[\text{CO}_3]^{--}$  Carbonate

$\text{Na}^+[\text{SO}_4]^{--}$  Sulfate

$\text{K}^+[\text{Cl}]^-$  Chlorate

L'eau de mer contient 35 g de sel/l dont 30 g Cl Na. Dans les régions calcaires les eaux sont bicarbonées calciques.

#### 23. 6 Sous-sol

Tales sunt aquae qualis est terra per quam flunt <sup>125</sup> Pline l'Ancien " De rerum natura "

Depuis longtemps ( cf . la citation de Pline en exergue tiré de " la nature des choses") l'on sait que la nature géologique du sous-sol influe sur la concentration des sels dissous de l'eau.

La présence de calcium reste vitale pour certains organismes (mollusques).

Sur des sous-sols de granit (roche éruptive) et de gneiss (roche métamorphique) les eaux sont dites silicatées.

#### 23. 7 Source d'alimentation

Pour permettre la survie de la réserve d'eau, il faut qu'elle dispose d'une alimentation, laquelle peut provenir :

d'un ruissellement temporaire

d'un ruissellement permanent

d'une inondation subite

### 24 Evolution et valeur

Dans le dessein d'estimer la « valeur » que présente tel étang, telle mare, qui risquent de devenir victimes de grands travaux, il faut tenir la **phénologie**<sup>126</sup> des espèces existant dans ledit étang ou ladite mare.

Cette action doit s'effectuer sur plusieurs saisons, tel étang ne possédant que des espèces banales au printemps, peut en contenir de remarquables en automne.

Une étendue évolue à l'échelle géologique, ainsi le bassin du Forez était un lac à l'époque tertiaire.

### 25 Impact sur le traitement des eaux d'égout

Du fait du brassage régulier des eaux d'un lac, la pollution qui y est rejetée agit rapidement. Il faudra donc une station d'épuration des eaux d'égout de haute qualité si le rejet s'effectue dans un lac (Annecy).

<sup>125</sup> Les eaux sont telles qu'est le terrain dans lequel elles coulent

<sup>126</sup> φαίνομαι = paraître ο λόγος = le discours

## 3 Les eaux courantes

Par opposition aux eaux dormantes, elles sont caractérisées par l'existence d'un **courant** dont l'importance conditionne la nature du fond et l'existence d'un certain renouvellement des substances charriées.

### 31 Définition

L'eau courante constitue un système dynamique caractérisé par un courant dont la vitesse est continuellement plus grande que zéro mètre par seconde, et dont les forces hydrauliques mises en jeu, permettent en tout cas le transport des plus petites particules vers l'aval.

Il existe donc : un débit liquide  
un débit solide

### 32 Types d'eau courante

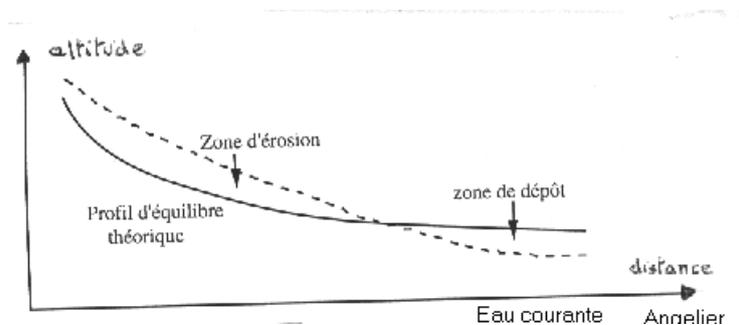
On les range en : source, torrent, rivière, fleuve... à chacun correspond un écosystème aquatique.

### 33 Critères potamiques

#### 33.1 Profil d'équilibre

En chaque point d'une rivière, s'établit, par le simple jeu – érosion, transport et dépôt de matériaux – ce qu'on appelle une pente d'équilibre. La pente en chaque point dépend de celle des points précédents et suivants, il en résulte pour l'ensemble d'un cours d'eau, un profil d'équilibre.

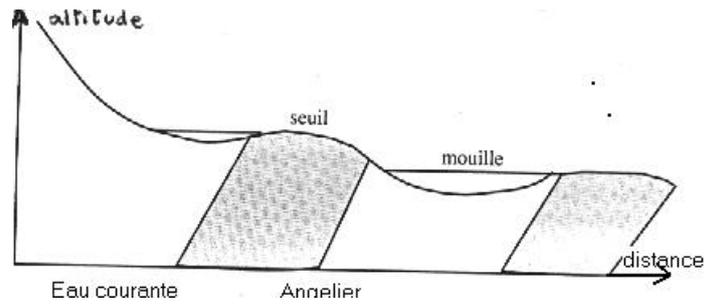
Cf. courbe infra



Il est assimilable à une branche d'hyperbole asymptote au niveau de base.

**La réalité** est, à vrai dire, moins simple, car la tectonique et la nature du terrain jouent un rôle dans le profil longitudinal qui apparaît comme une succession de seuils et de mouilles en fonction de la dureté des roches.

Cf. graphique infra



### 33. 2 Transport

#### 332. 1 Puissance de l'eau en mouvement ou énergie potamique

L'eau s'écoule avec une vitesse fonction de la pente  $i$

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} \text{ (Manning)} \quad \text{OU} \quad u = c \sqrt{R i} \text{ (Chézy)}$$

$u$  = vitesse courant ;  $n$  ou  $c$  : rugosité du lit ;  $R = \omega / \chi$  rayon hydraulique;  $i$  = pente de la rivière  
L'on peut écrire :

**Energie potamique nette = énergie potamique brute – frottement – turbulence – matières transportées**

- Energie potamique brute

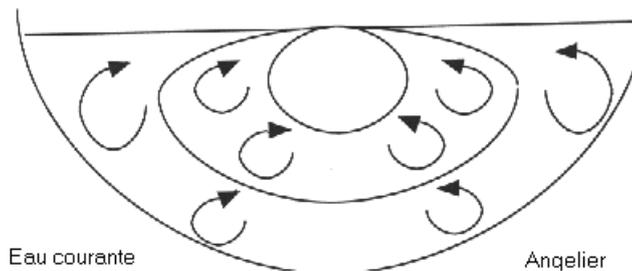
$$E_b = \frac{1}{2} m u^2 \text{ (énergie cinétique)}$$

mais  $m = \omega \cdot u$  (section  $\omega$  . vitesse = débit)

$$\text{donc } E_b = \frac{1}{2} \omega \cdot u^3$$

- Energie potamique nette

Mais les frottements et la turbulence absorbent de la puissance. Les filets d'eau ne présentent pas une allure rectiligne, au milieu et en surface, la vitesse reste plus élevée ; le phénomène de turbulence se produit, sorte de pulsations verticales. Cf. schéma *infra*



Le nombre de Reynolds, **caractérise l'influence de la viscosité sur le mouvement**

$$R = \frac{u \cdot R}{\nu} \quad \text{(apparition de turbulence)}$$

$\nu$

$R$  = rayon hydraulique ;  $u$  = vitesse de courant ;  $\nu$  = viscosité cinématique ,

Le frottement est défini par la force tractrice :  $\tau = \rho g R i$  si  $F \geq 0,6$  ( apparition de l'érosion)

Le nombre de Froude  $F = \frac{u}{\sqrt{gR}}$  **caractérise l'influence de la pesanteur sur le mouvement**

$$(gR)^{1/2}$$

Si  $F \geq 1$ , cela indique , que la vitesse  $u$  est supérieure à  $\sqrt{gR}$ , énergie de position, donc régime torrentiel

Si  $F \leq 1$ , cela indique, que la vitesse  $u$  est inférieure à  $\sqrt{gR}$ , énergie de position, donc régime fluvial

Exemple : Soit un ruisseau avec un rayon hydraulique  $R = 1 \text{ m}$

Régime turbulent à deux conditions si  $R > 2000$  ( $u > 20 \text{ cm/s}$ ) et si  $F > 1$ , régime torrentiel

Régime laminaire à deux conditions si  $R < 500$  ( $u < 5 \text{ cm/s}$ ) et si  $F < 1$ , régime fluvial

Si énergie potamique nette positive, la rivière érode et transporte

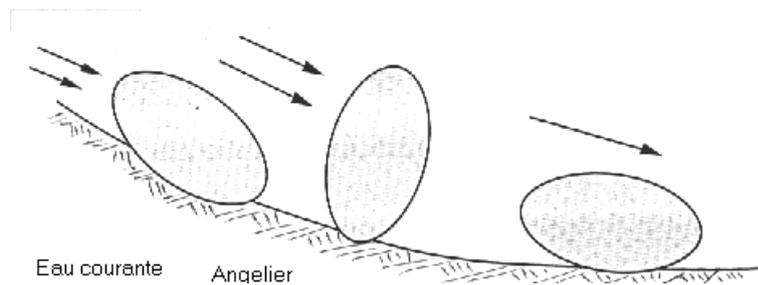
Si énergie potamique nette = 0, la rivière transporte mais n'érode plus

Si énergie potamique nette négative, la rivière dépose des sédiments pour que  $E_n \rightarrow 0$

### 332. 2 Transport par charriage

Les matériaux les plus gros : blocs, galets, sont déplacés par charriage sur le fond.

cf. schéma infra



Un courant de  $1 \text{ m/s}$  ébranle un galet de  $7 \text{ cm}$ .

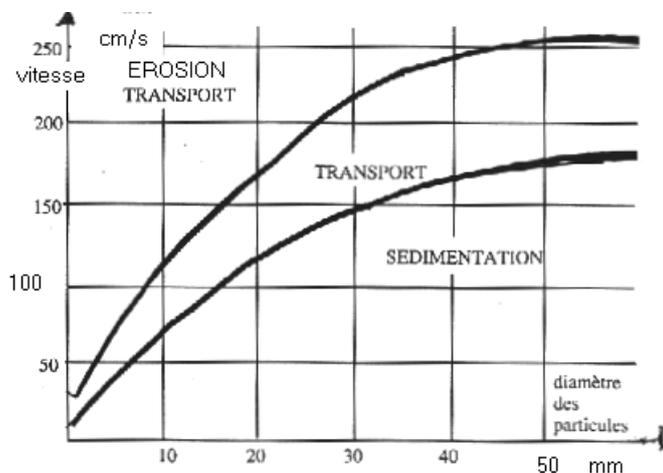
### 323. 3 Transport en suspension

La charge limite est le poids maximum de matériaux qu'une eau courante peut transporter en fonction de sa vitesse.

Lorsque la pente diminue d'amont en aval, la charge limite diminue et les matériaux sont abandonnés sur le fond. Ceux dont le calibre est le plus élevé sont déposés les premiers (dans une gravière, la calibre à l'aval  $<$  que le calibre à l'amont)

Les courbes de Hjulström indiquent les relations entre la vitesse du courant, l'érosion, le transport en suspension et la sédimentation.

cf. graphique infra



### 332. 4 Transport en solution

Les électrolytes en solution dans l'eau reflètent la nature géologique des terrains traversés. Le tableau infra représente les analyses chimiques effectuées à Entraygues sur le Lot et la Truyère avant leur confluence.

critères	Lot	Truyère
pH	8,5	6,5
Calcium mg/l	27,2	4,4
Alcalinité mg/l CO <sub>3</sub> Ca	74,8	18
Silice	7,3	10,5

La Truyère n'a traversé que des granites et des basaltes et des formations cristallophylliennes, alors que le Lot, s'il a longé sur sa rive droite, des roches granitiques et cristallophylliennes, côtoie sur sa rive gauche, les calcaires du Causse de Sauveterre.

### 33. 3 Ecoulement

Pour que les organismes se développent aisément, il faut qu'ils se placent dans des zones abritées :

- la couche limite et derrière les obstacles en montagne
- dans le lit mineur et le lit majeur en plaine

#### 333. 1 Couche limite sur le fond

Sur le substratum<sup>127</sup> (fond) le courant se ralentit et il se forme une couche d'eau à écoulement laminaire et non plus turbulent d'épaisseur faible, quelques millimètres.

#### 333. 2 Obstacles générateurs d'eaux mortes

Les galets, blocs, créent des zones calmes, car la trajectoire des filets d'eau décolle et passe au-dessus. A l'aval, se formera un rouleau dont le mouvement est plus lent que celui de la pleine eau. Cf. graphique infra



#### 333. 3 Lit mineur et lit majeur

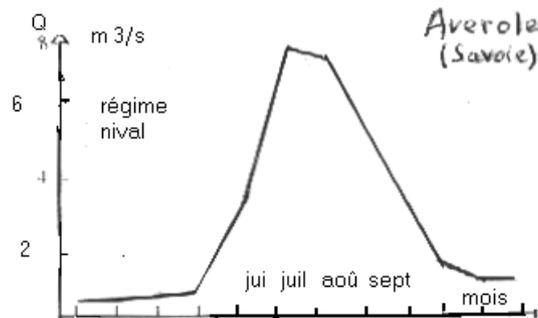
En plaine, le lit mineur est doublé d'un lit majeur ou champ d'inondation recouvert lors des crues. Il se constitue un hydrosystème lié à l'hydrodynamique fluviale : aquatique, semi-aquatique et terrestre, sols colonisés par des forêts alluviales de saules, aulnes, peupliers par exemple les lînes du Rhône et les gours de la Loire.

#### 33. 4 Régime des eaux

Le débit des cours d'eau varie au cours de l'année et présente des hautes eaux (crues) et des basses eaux (étiage). En France, on trouve : le régime nival, le régime pluvial océanique et le régime méditerranéen.

Cf. graphique ci-contre

<sup>127</sup> sub : dessous et stratum , i : la couverture



### 34 Critère thermique

La température conditionne les possibilités de développement et la durée du cycle biologique de chaque espèce. En chaque point du profil longitudinal, la température apparaît comme une fonction (altitude, saison, régime hydraulique). Les manifestations de l'activité cellulaire se produisent entre une température minimale et une température maximale.

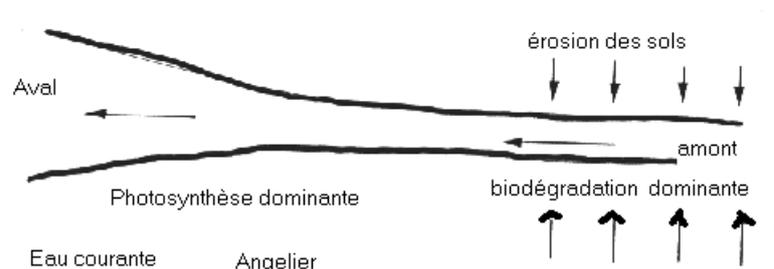
### 35 Fonctionnement des écosystèmes

#### 35.1 Principe

La puissance de l'eau érode les matériaux du bassin-versant, les ressources nécessaires au fonctionnement de l'écosystème (sels minéraux, nécromasse) et entraîne les organismes vivants.

Le fonctionnement se déroulera selon un gradient horizontal

cf. schéma infra



L'écosystème se trouve fondé sur les matériaux organiques transportés par les organismes détritivores qui s'en nourrissent et par les champignons et bactéries qui les dégradent et les oxydent.

Ensuite, ces matériaux oxydés favorisent les algues fixées ou en suspension, pour leur photosynthèse, ceci dans l'aval du cours d'eau.

Pour la chaîne trophique animale, dans le cours supérieur, la nécromasse reste la base, comme sur un sol, alors que dans le cours inférieur il existe des herbivores servant de nourriture aux carnivores.

#### 35.2 Insectes et courant

La tendance à s'orienter face au courant est générale chez ces animaux. Certaines larves peuvent résister à des vitesses de 2 m/s.

#### 35.3 Plancton et courant

Il est constitué d'un ensemble d'organismes de petite taille dont les mouvements propres restent insuffisants pour le délivrer du courant, le plancton se trouve donc en dérive. Il faut une profondeur d'au moins ..... 1 m et un courant lent pour qu'il prospère.

### 35. 4 Poissons et courant

La possibilité pour un poisson de se maintenir dans une eau courante et de résister à l'entraînement dépend de sa vitesse de nage.

Les poissons aplatis résistent mal, alors que ceux en forme de torpille (truite) offrent une meilleure résistance. Une truite sauvage, à âge égal, restera plus petite qu'une truite d'élevage, en raison de l'importante dépense énergétique.

### 35. 5 Organismes et lumière

Chez les végétaux, la lumière contrôle la photosynthèse.

Chez les animaux, la lumière joue un rôle indirect déterminant les phases d'activité.

## 36 Chaîne trophique et flux d'énergie

### 36. 1 Apport extérieur de matériaux

Il s'agit de matériaux tombant dans l'eau depuis la forêt riveraine (feuille) et du transfert vers l'eau de la litière du bassin-versant.

### 36. 2 Action des consommateurs

#### 362. 1 Action des bio-réducteurs

Ces détritiques constituent les aliments des bio-réducteurs (décomposeurs) transformant la matière organique morte en éléments minéraux. Ce travail est accompli par des champignons et des bactéries.

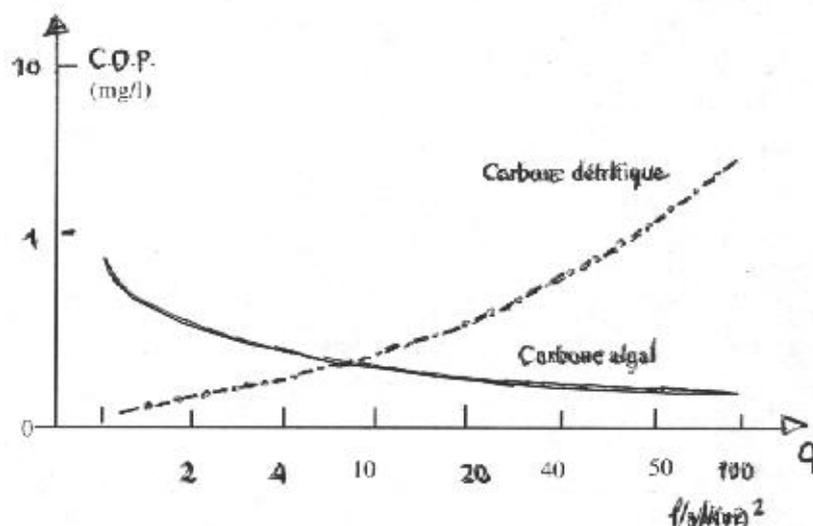
#### 362. 2 Action des autres consommateurs

Les consommateurs agissent en prédateurs des décomposeurs comme : larves d'insectes, gastéropodes ; carnassiers : brochets, sandres, hérons, mouettes se nourrissant de la faune aquatique.

### 36. 3 Présence de producteur

Le plancton n'apparaît que lorsque la vitesse est lente.

Sur le graphique infra l'on remarque que pour de faibles débits, le carbone algal est fort, alors que pour des débits de crue, il baisse (les algues dérivent). Il s'agit de la Vire en Normandie.



### 37 Impact sur le traitement des eaux d'égout

Si du fait du courant, la rivière possède une certaine capacité d'auto-épuration lui permettant, grâce à ses organismes, de digérer sans dommage une certaine quantité d'eau polluée, cela présente des limites.

Lorsqu'elles sont atteintes, la rivière commence par devenir eutrophiée, c'est-à-dire qu'elle présente une prolifération des organismes végétaux, puis devient ensuite vide de toute vie organique.

DONC, le concepteur du traitement des eaux d'égout devra tenir compte du débit de la rivière, des fluctuations dudit débit, des microorganismes y habitant qui lui confèrent une capacité d'auto-épuration.

Enfin, il faut connaître la qualité de l'eau que l'on veut garder dans la rivière ; haute qualité pour une rivière à truite par exemple.

## 4 Le cycle de l'azote

### 41 La représentation schématique

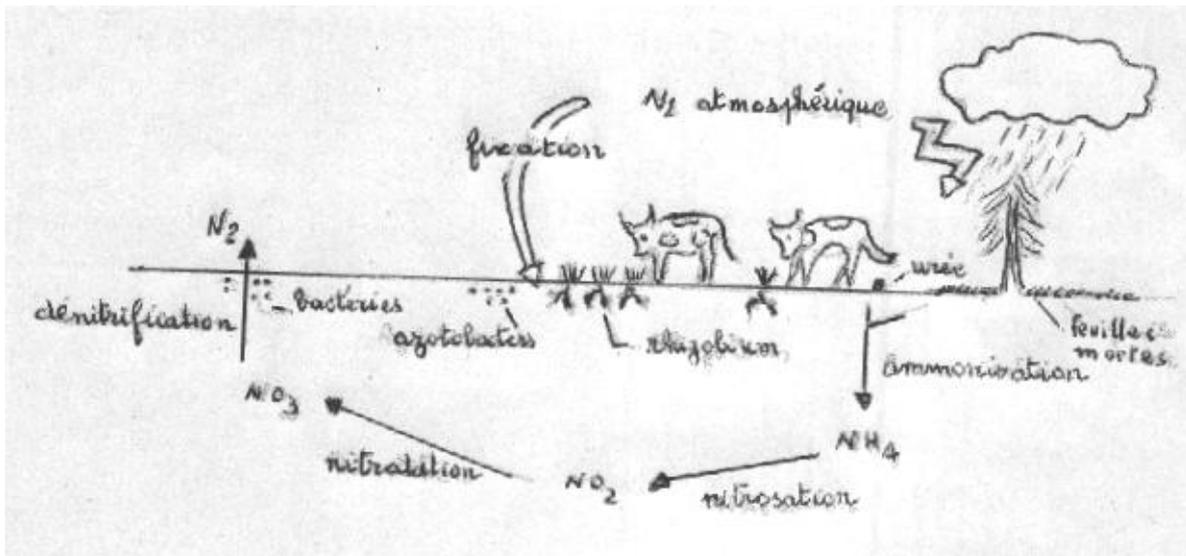
L'azote atmosphérique, soit 79 % de l'air, constitue la **source** initiale de l'azote.

La **fixation** de l'azote s'effectue soit par les phénomènes comme l'**éclair**  $\rightarrow$   $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$  et avec l'eau  $\text{NO}_3 \text{H}$  assimilable par les végétaux sous forme de nitrates soit par l'intermédiaire de **microorganismes** tels Azotobacter ou Rhizobium leguminosorum qui jouent le rôle de **PRODUCTEURS**.

Une fois fixée, l'azote poursuit son cycle sous la forme **organique** qu'elle soit végétale ou animale. Chaque maillon (séquence) de la chaîne trophique (alimentaire) utilisant – en la mangeant – l'azote contenu dans la séquence précédente pour constituer ses propres **cellules**. Cela définit l'action des **consommateurs**.

Ensuite cet azote organique va être livré aux **bio-réducteurs** lesquels, par les étapes successives de l'ammonisation, de la nitrosation, de la nitrification, vont le **minéraliser** à l'état de nitrates assimilables directement par les végétaux.

Enfin, des bactéries anaérobies et hétérotrophes vont réduire les nitrates, libérant l'azote qui **retourne dans l'atmosphère** ; il s'agit de la **dénitrification**. Cf. schéma *infra*



## 42 La fixation par les producteurs

Certains êtres **unicellulaires** s'avèrent capables de fixer l'azote atmosphérique ; mais jusqu'à présent, on n'a pas découvert de moyen efficace pour assurer leur prolifération.

### 42.1 Par l'action d'Azotobacter :

Au 19<sup>e</sup> siècle, Berthelot constatait la fixation de ..... 22 mgN/kg de terre en 5 mois ; cela est dû à un microbe aérobique pullulant dans le sol pourvu que le pH > 6 et qu'il agisse **seul** ; on l'appellera « Azotobacter ».

### 42.2 Par l'action de microbes sur des végétaux :

Sur les racines des légumineuses telles que : luzerne, haricots, pois, on avait constaté la présence de **nodosités** lesquelles représentent l'organisme de *Rhizobium leguminosarum* qui vit en symbiose avec la plante.

- de son vivant, il fournit N à la plante  
il reçoit C et H de celle-ci
- après la récolte sa matière organique reste, et en pourrissant, enrichit le sol en N

## 43 L'utilisation par les consommateurs

### 43.1 Les végétaux :

Ceux-ci utilisent l'azote qu'ils puisent sous forme de nitrates pour constituer les protéines de leurs cellules.

### 43.2 Les animaux :

- les herbivores : en mangeant les végétaux, ils acquièrent l'azote nécessaire pour assurer leur métabolisme.
- les carnivores : le fait de dévorer l'animal herbivore leur donne l'azote indispensable à leur vie. L'animal carnivore représente une autre séquence de la chaîne trophique par rapport au cas précédent qui peut s'illustrer ainsi :

→ phytoplancton → poisson → oiseau →

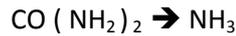
En mer, l'élément végétal est représenté par le phytoplancton.

## 44 La transformation en N minéral par les bio-réducteurs

Les déjections des animaux, de même que leurs cadavres, ainsi que les végétaux morts constituent une source de nourriture pour les microorganismes qui vont minéraliser l'azote contenu dans ces déchets. Cette opération va s'effectuer en plusieurs étapes.

### 44.1 Ammonisation :

Sous l'influence de microorganismes, les éléments azotés protéïdiques sont **transformés** en ammoniac, par exemple l'urée :



#### 44. 2 Nitrosation

Certaines bactéries oxydent l'ammoniac en présence de l'air pour donner  $\text{NO}_2\text{H}$ . Ces organismes aérobies et autotrophes vis-à-vis de C, utilisent l'énergie de la réaction ci-dessous pour réduire le gaz carbonique de l'air et en tirer le C nécessaire à leur métabolisme :



#### 44. 3 Nitratation

A son tour, l'acide nitreux  $\text{NO}_2\text{H}$  se trouve, selon le processus exposé supra, **oxydé** à son tour par un microorganisme désireux d'obtenir de l'énergie pour réduire  $\text{CO}_2$



### 45 La dénitrification

Il existe des bactéries anaérobies et hétérotrophes vis-à-vis de C, c'est-à-dire qui pour leur synthèse cellulaire prennent le carbone organique .

Ces organismes réduisent les nitrates et libèrent  $\text{N}_2$  le cycle se trouve ainsi bouclé. Lesdits organismes sont fréquemment répandus dans le sol en particulier dans les terrains lourds et humides puisqu'ils sont anaérobies.

Certains d'entre eux réduisent bien les nitrates en dégageant  $\text{NH}_3$  sans libérer  $\text{N}_2$

### 46 Impact de ce cycle sur l'environnement

Ainsi que cela sera exposé infra, les différentes combinaisons de l'azote jouent un rôle **essentiel** en matière de POLLUTION.

#### 46. 1 Potabilité de l'eau

Les nitrates provenant de l'oxydation finales de l'azote peuvent être dangereux à cause du danger de l'enrichissement du sang en hémoglobine (maladie bleue des enfants) la teneur doit rester < ...50 mg / l

En Europe, l'augmentation de la teneur en nitrates est due à l'emploi massif des engrais minéraux.

#### 46. 2 Epuration biologique de l'eau usée

L'on confie le soin de purger l'eau de ses matières organiques polluantes, à des microorganismes qui vont **dévor**er lesdites matières pour :

- obtenir l'**énergie** nécessaire aux synthèses cellulaires
- satisfaire les besoins de **croissance**
- entretenir la **vie**

L'eau d'égout est amenée dans des bassins **aérés** où l'on développera des cultures bactériennes (appelées boues activées) qui vont absorber les matières polluantes selon le processus décrit supra en la **minéralisant** (nitrates).

#### 46. 3 Valeur fertilisante d'un compost d'ordures

Dans un amendement organique, la teneur en C varie peu, à l'inverse de la teneur en N. Le rapport C/N indique la « **capacité minéralisatrice** » de l'azote si C/N est bas, l'azote se minéralise et devient assimilable par la plante :

désignation	C/N	observations
paille	168	la paille a de la cellulose surtout

compost	23	après 6 jours de maturité
sol cultivé	10	il contient 10 fois plus de C que N
sang séché	3,4	riche en azote

#### 46. 4 Précipitations atmosphériques acidulées

Au contact de l'humidité de l'air, les dioxydes de soufre SO<sub>2</sub> émis par le chauffage au **fioul** surtout, ainsi que les oxydes azotiques NO et les peroxydes d'azote NO<sub>2</sub> issus principalement de la carburation **automobile** forment de l'acide nitrique et de l'acide sulfurique qui peuvent être transportés par le vent sur de longues distances et entraîner :

- des maladies des voies respiratoires
- le dépérissement des forêts
- l'attaque de la pierre des monuments

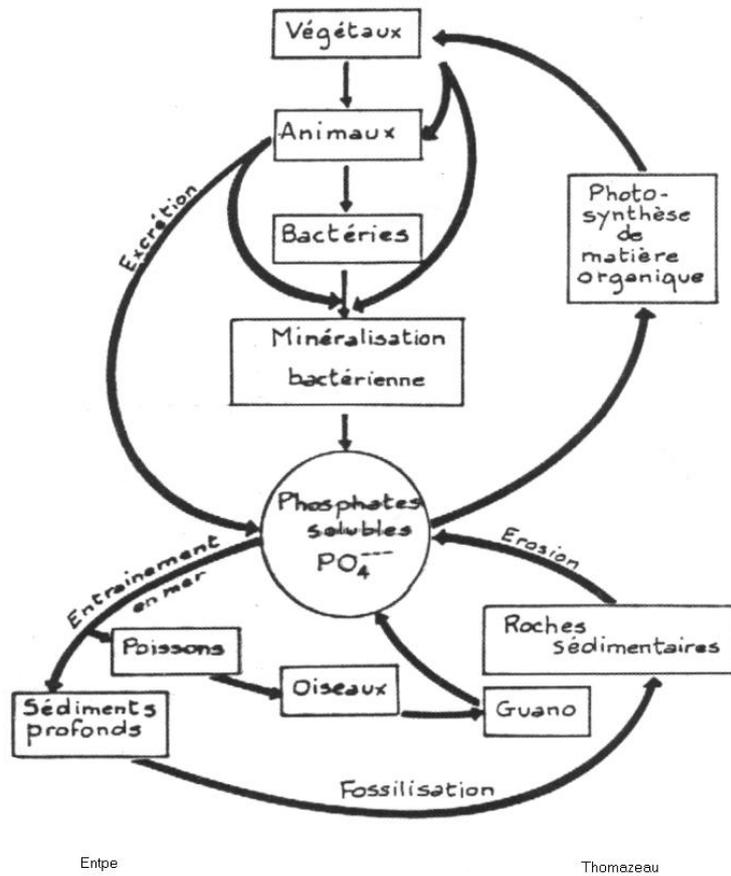
## 5 Le cycle du phosphore

### 51 La représentation schématique

La présence du phosphate est due à l'érosion et à la **dissolution des roches sédimentaires** ou volcaniques qui libère des phosphates solubles, capturables par les plantes.

De là, il poursuit son cycle sous forme organique dans les végétaux, puis les animaux, chaque maillon de la chaîne trophique utilisant – en le mangeant – le phosphore du maillon précédent, cela définit l'action des consommateurs.

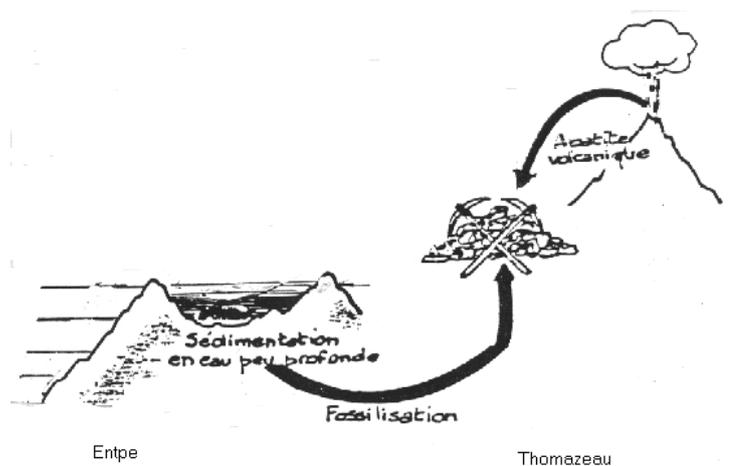
Ensuite, ce phosphore organique va être livré aux bio-réducteurs (bactéries) qui vont le **minéraliser** à l'état de phosphates utilisables par les végétaux terrestres ou marins. cf. schéma *infra*



## 52 Origine du phosphore

Il provient de la sédimentation des phosphates en eau peu profonde qui subissent une fossilisation. Il peut aussi trouver son origine dans une éruption volcanique, ainsi l'on trouve l'apatite composée surtout de phosphate de calcium souvent chloré.

cf. croquis ci-contre



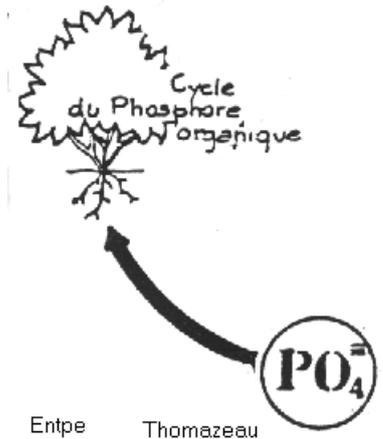
## 53 L'utilisation par les consommateurs

### 53. 1 Les végétaux

#### 531. 1 Les végétaux terrestres

Ceux-ci utilisent le phosphore qu'ils puisent sous forme de phosphate, pour constituer leurs cellules.

cf. croquis ci-contre

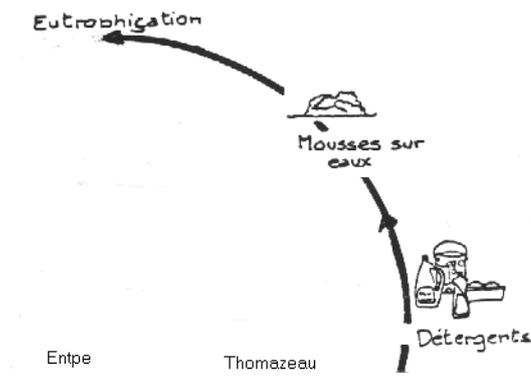


Entpe Thomazeau

### 531. 2 Les végétaux aquatiques

#### ●En rivière

Les produits lessiviels, détergents rejetés en rivière, créent des mousses, puis entraînent une prolifération des végétaux aquatiques tels que les lentilles d'eau, *ranonculus aquatilis*...



Entpe Thomazeau

(phénomène d'eutrophisation)

cf croquis ci-

#### ●En mer

Les rivières se déversant en mer, les phosphates serviront de nourriture au phytoplancton.

### 53. 2 Les animaux

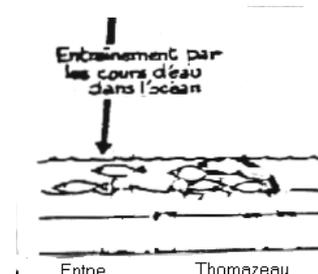
#### 532. 1 Les herbivores

En mangeant les végétaux, ils acquièrent le phosphore nécessaire pour assurer leur métabolisme.

• Par exemple :

le cerf mange les feuilles de l'arbre ;  
de même le poisson consomme le plancton.

cf. schéma ci-contre



Entpe Thomazeau

#### 532. 2 Les carnivores

Le fait de dévorer l'animal herbivore leur donne le phosphore indispensable à leur vie.



Entpe Thomazeau

phytoplancton → poisson → oiseau

Le très poissonneux océan Pacifique, le long des côtes du Chili a entraîné la présence d'oiseaux consommateurs de poissons.

cf. schéma ci-contre

Les fientes de ces oiseaux constituent le guano, riches en phosphate et exporté dans le monde entier.

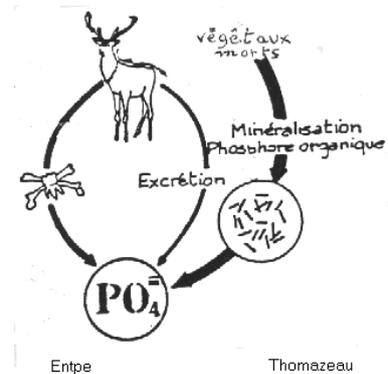
## 54. La transformation en P minéral par les bio-réducteurs

Les excréments des animaux (cf. supra le guano) de même que leurs cadavres ainsi que les végétaux morts constituent une source de nourriture pour les microorganismes qui les minéralisent.

f. croquis ci-contre

### 55. Impact de ce cycle sur l'environnement

Longtemps en matière d'épuration des eaux d'égout on ne s'est préoccupé que de la destruction de l'azote. Depuis quelques décennies, il est apparu nécessaire de détruire aussi le phosphore en provenance des égouts urbains et puissant facteur d'eutrophisation des cours d'eau. De nombreuses stations ont rajouté un système de déphosphoration à leur système de dénitrification existant



# La Pollution

## 1 Les paramètres d'une pollution

11 Demande biochimique en oxygène

12 Demande chimique en oxygène

13 Matières en suspension

14 Matières inhibitrices

## 2 Les types de pollution

21 Selon la nature

22 Selon la répartition spatio-temporelle

23 Selon l'origine du polluant

24 Selon l'impact sur le milieu aquatique

### 3 Les conséquences de la pollution

#### 31 Effets sur le fonctionnement des écosystèmes

#### 32 Effets sur les organismes

#### 33 Effets sur la potabilité de l'eau

## 1 Les paramètres de la pollution

“ Το νερό είναι το αγαθό το πιο απαραίτητο  
για την διατήρηση της ζωής ” Πλάτων ( 426–367 ) π.χ.<sup>128</sup>

Dès l'antiquité Platon attirait déjà l'attention sur la valeur de l'eau. Il importe donc aujourd'hui de la protéger contre les pollutions et donc de connaître ces dernières.

Dans le dessein de pouvoir juger de façon quantitative la pollution apportée par le rejet d'une eau d'égout dans une rivière, il fallut définir certains paramètres.

### 11 Demande biochimique en oxygène sur 5 jours<sup>129</sup>

#### 11.1 Définition

Selon la norme AFNOR T 90 103 de déc. ' 75 , il s'agit de la quantité d'oxygène consommée par les microorganismes contenus dans le rejet en cinq jours, ledit rejet restant conservé dans l'obscurité à 20° C.

La valeur permet d'estimer la quantité d'oxygène que devra **fournir le milieu récepteur** (par exemple la rivière) pour assurer la dégradation aérobie des matières contenues dans le rejet, elle s'exprime en mg d'oxygène consommé par litre.

#### 11.2 Evolution

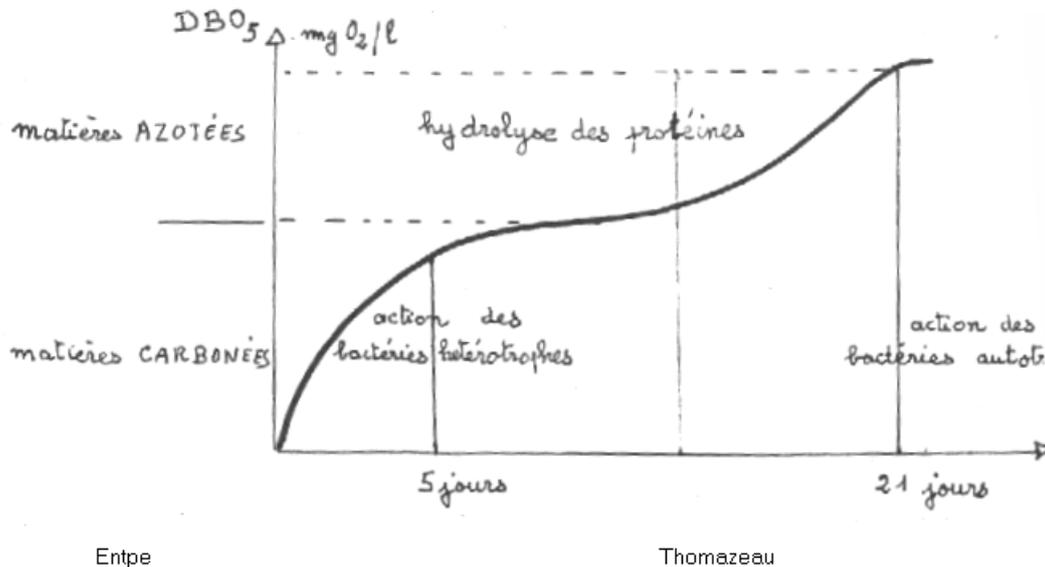
Dans une eau usée urbaine, l'oxydation biologique des matières dégradables demande 21 jours

---

<sup>128</sup> L'eau est le bien le plus nécessaire à l'entretien de la vie .( Loi VIII de Platon)

<sup>129</sup> norme britannique , car les rivières anglaises mettent 5 jours au plus pour rejoindre la mer

cf graphique infra.



La DBO<sub>5</sub> sert d'abord à oxyder la partie **carbonée** du rejet par le truchement des bactéries hétérotrophes qui effectuent leur synthèse cellulaire à **partir du C organique**, alors qu'après hydrolyse<sup>130</sup> les bactéries autotrophes, qui effectuent leur synthèse cellulaire à **partir du CO<sub>2</sub> atmosphérique**, agiront sur la partie **azotée**.

## 12 Demande chimique en oxygène

En vertu de la norme AFNOR T 90 101 de sept. ' 71, il s'agit de la quantité d'oxygène consommée en **deux heures** par l'oxydation de toutes les matières contenues dans le rejet au moyen du bichromate de potassium

$\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$  à une température de 140 ° C.

La DCO s'exprime également en mg O<sub>2</sub>/ litre, sa valeur permet de connaître la quantité d'oxygène que devra fournir le milieu récepteur non seulement pour les microorganismes du rejet ( DBO<sub>5</sub> ) mais aussi celui nécessaire pour oxyder certaines substances non biodégradables comme le plomb.

Dans le rejet d'une eau résiduaire urbaine

$\frac{\text{DCO}}{\text{DBO}_5} = 2,5$

DBO<sub>5</sub>

## 13 Matières en suspension

D'après la norme AFNOR T 90 105 de mars ' 72 il s'agit des particules **décantables** et des matières colloïdales<sup>131</sup> extraites du liquide, par rejet par centrifugation suivi d'un séchage à 105 ° C pour évaporer l'eau.

La MES s'exprime en mg/litre ; si l'on chauffait ensuite à 500 ° C les matières volatiles disparaîtraient créant une perte de poids qui mesure donc les MVS, matières volatiles, du liquide.

## 14 Matières inhibitrices

<sup>130</sup> η λύση : le dénouement

<sup>131</sup> η κόλλα : la colle et το είδος : la forme

Dans le dessein d'apprécier la **toxicité** d'un rejet, l'on constate le degré de mortalité au bout de 24 heures de petits crustacés appelés **daphnies**, connus sous le nom de *Daphnia magna* Straussi et qu'on introduit dans le rejet.

## 2 Des types de pollution

Più l'acqua ci é accessibile, più é fragile

### 21 Selon la nature

#### 21.1 Pollution physique

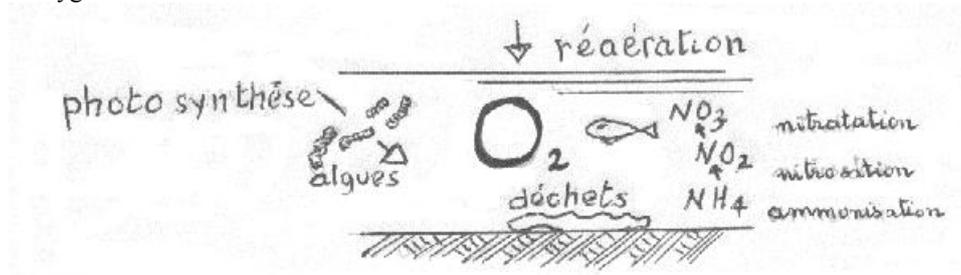
La présence de matières en suspension M.E.S. de sable et d'argile réduit la transparence de l'eau et peut agir sur la température.

#### 21.2 Pollution chimique

Elle provient des substances dissoutes indésirables telles que : des sels, des acides, des alcalins, ou encore des toxiques comme les pesticides et les métaux.

#### 21.3 Pollution organique

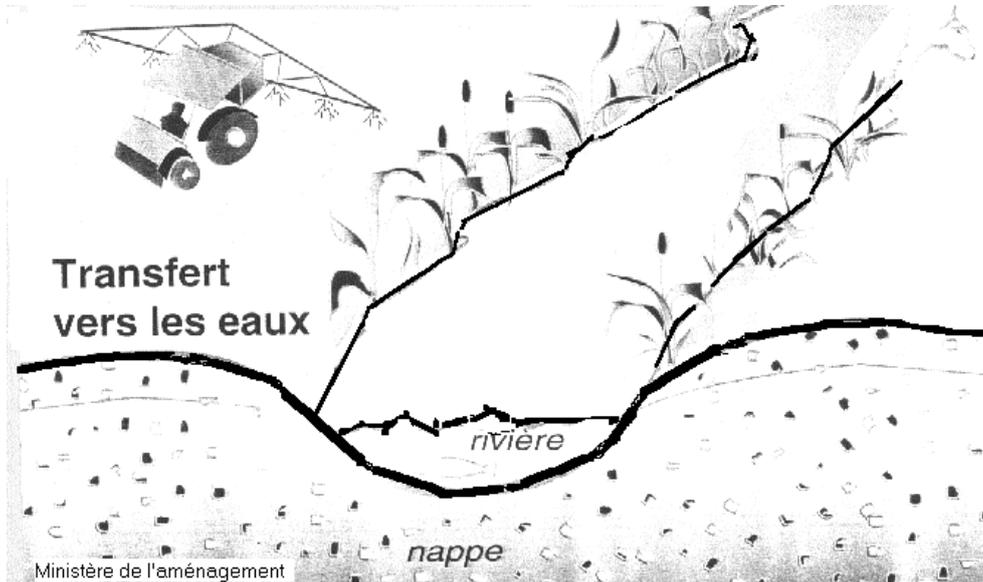
La présence de matières organiques entraînera une **surconsommation d'oxygène** au détriment de la faune piscicole.  
cf. cycle de l'oxygène dissous infra.



### 22 Selon la répartition spatio-temporelle

## 22.1 Pollution diffuse

Elle reste la plus complexe à contrôler parce qu'elle est liée à une multitude de sources réparties sur l'ensemble du bassin-versant. Des engrais ou des pesticides appliqués en trop grande quantité sur les champs et dont les matières actives finissent par rejoindre les cours d'eau et/ou la nappe.  
cf. croquis infra



## 22.2 Pollution ponctuelle

En ce cas c'est en un point que le polluant se déverse dans le cours d'eau.

- Exemple : Le lisier d'un élevage de cochons qui par un égout débouche dans une rivière.

## 22.3 Pollution chronique

Cette fois, il s'agit d'une pollution régulière qui arrive dans la rivière.

- Exemple : Les eaux d'égout d'une station de ski : l'été, la station d'épuration suffit, mais l'hiver, à cause des skieurs, elle ne joue plus son rôle, et la rivière, milieu récepteur, devient polluée.

## 22.4 Pollution accidentelle

Elle survient suite à un accident, un défaut technique, une erreur de manœuvre.

- Exemple : Une usine d'équarrissage (transformant les cadavres d'animaux en combustible) traite parfaitement les eaux usées ; mais un jour, la cuve des collectes desdites eaux se déverse dans l'égout puis dans la rivière, au grand dam des pêcheurs, car sur des kilomètres, les poissons meurent.

## 23. Selon l'origine des polluants

### 23.1 La pollution domestique

Elle est provoquée par l'usage de l'eau des habitants. On décompte ..... 150 l/personne/jour tant pour les eaux vannes (WC, salle de bain) que ménagères (cuisine, lavage).

Il faut y ajouter les eaux de lavage des rues, celles des commerces et des collectivités, ceci représente..... 500 l / personne / jour.

### 23.2 La pollution industrielle

Le degré et la nature de la pollution varient selon la spécificité de chaque activité industrielle.

- Exemples : - Une tannerie rejettera des déchets de chrome (pollution chimique)
  - Une cave coopérative véhiculera des déchets de rafle (pollution organique)
  - Une centrale thermique, pour son refroidissement, réchauffera l'eau de la rivière (pollution physique).

### 23. 3 La pollution agricole

Elle s'intensifie depuis que l'agriculture est entrée dans un stade d'industrialisation. Elle trouve son origine dans :

#### 233. 1 Les déjections animales.

Ex : les porcheries : le lisier qui en découle s'avère très polluant.

**232. 2 Les pesticides** auxquels ont recours les agriculteurs pour lutter contre les insectes indésirables, les mauvaises herbes ou toute maladie s'attaquant aux cultures.

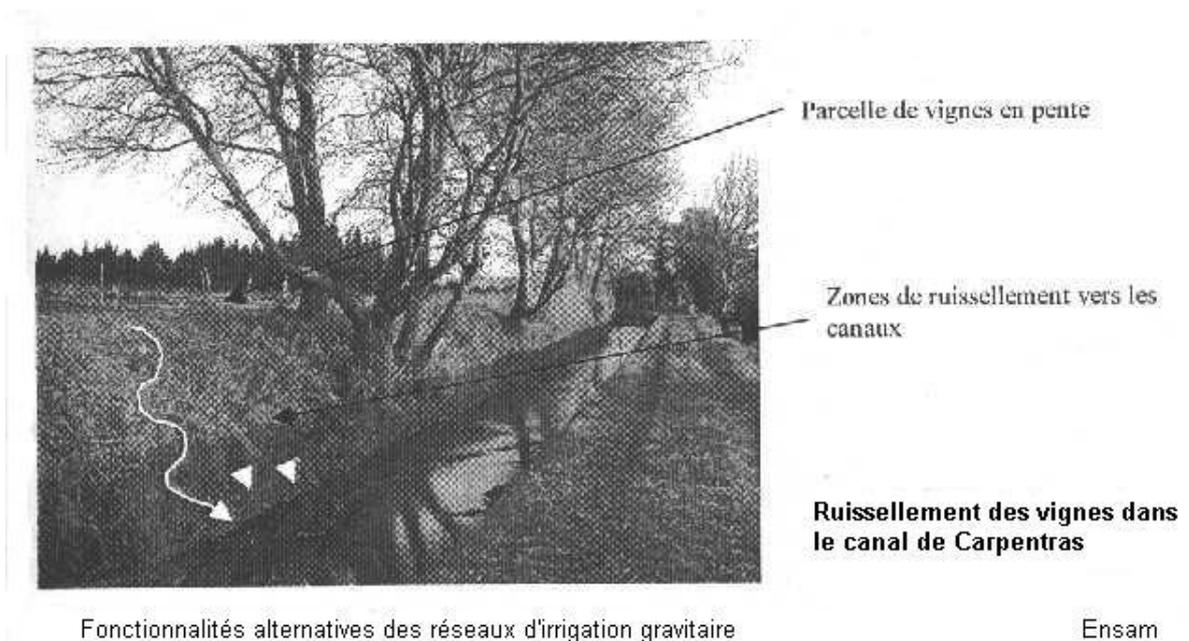
- Exemple : Dans le bassin de la rivière l'Assomption au Canada, le taux moyen d'utilisation des pesticides s'élève à 2,2 kg d'ingrédients actifs / ha. L'aldicarbe, un insecticide utilisé jusqu'en 1990 pour la pomme de terre contaminait encore les puits en..... 1993.

#### 233. 3 Les nitrates, les phosphates

Ils altèrent bien évidemment la qualité des cours d'eau et des nappes souterraines vers lesquels ils sont entraînés par ruissellement.

- Exemple : Les vignes situées au-dessus et au bord du canal de Carpentras laisseront forcément les engrais s'écouler dans ledit canal entraînant son eutrophisation.

cf. photographie *infra*



## 24 Selon l'impact sur le milieu aquatique

### 24.1 Impact trophique

L'irruption de pollution organique, non toxique, modifie l'équilibre de l'écosystème, surtout si la masse d'eau s'avère insuffisante pour diluer l'effluent.

Cette pollution biodégradable (matières organiques) résulte essentiellement des rejets domestiques et des industries agro-alimentaires ; on peut donc la qualifier de trophique dans la mesure où elle apporte des nutriments à la rivière tout comme les détritiques issus du bassin-versant.

Dans le phénomène de bio-dégradation subséquent à une pollution trophique, les bactéries hétérotrophes se développeront en consommant de l'oxygène. Le résultat final de la biodégradation conduira à un apport de nutriments minéraux, **source d'eutrophisation différée**.

## 24. 2 Impact toxique

Les éléments toxiques (métaux, pesticides) entraînent des toxicités aiguës ou chroniques qui tueront la faune et la flore ou l'endommageront gravement.

# 3 Conséquences de la pollution sur les eaux

“ ... l'homme boit 80 % de ses malaises ... ” Pasteur

## 31 Effets sur le fonctionnement des éco-systèmes

### 31. 1 Généralités sur la nécessité de l'épuration.

Quotidiennement dans les milieux récepteurs (rivières, lacs, mers) arrivent des rejets polluants sans lien avec l'activité anthropique ; par exemple : cadavres d'animaux, feuilles mortes, terre .....

La nature a heureusement pourvu à cette situation et la rivière traite **elle-même** cette charge par l'oxygène et les micro-organismes qu'elle contient.

Mais en cas de rejet urbain la rivière a parfois besoin **d'être aidée** dans son action par une installation d'épuration.

### 31.2 Pouvoir auto-épurateur des rivières

Il définit la capacité de la rivière à traiter **seule** une pollution inopinée ou chronique liée à l'activité anthropique, elle est fondée sur sa teneur en oxygène.

#### 312.1 Apport d'oxygène

L'oxygène contenue dans une rivière provient essentiellement de l'atmosphère et accessoirement de la photosynthèse<sup>132</sup>. Il s'exprime en pourcentage de la saturation par dissolution, laquelle saturation reste fonction de la température, ainsi :

l'eau contient ..... 14, 6 mg O<sub>2</sub> / litre à 0 °  
..... 9, 2 mg O<sub>2</sub> / litre à 20 °

#### 312.2 Consommation d'oxygène

---

<sup>132</sup> το φως, φώτος : la lumière et η σύνθεση : la composition

Elle est due à trois facteurs :

- la consommation intrinsèque due aux êtres **vivants** dans la rivière **avant** l'irruption du polluant,
- la consommation due au **rejet** que l'on peut assimiler à la DBO<sub>5</sub> des matières carbonées,
- la consommation due aux **dépôts** qui demeure faible tant que ces dépôts restent au repos

### 31.3 Expression algébrique du pouvoir auto-épurateur

Le bilan entre l'apport d'oxygène et sa consommation s'établit selon l'équation

$$\frac{dD}{dt} = K_1 L - K_2 D$$

avec

D : déficit en O<sub>2</sub> par rapport à la saturation (en mg O<sub>2</sub> / litre)

L : DBO<sub>5</sub> totale à chaque instant (en mg O<sub>2</sub> / litre)

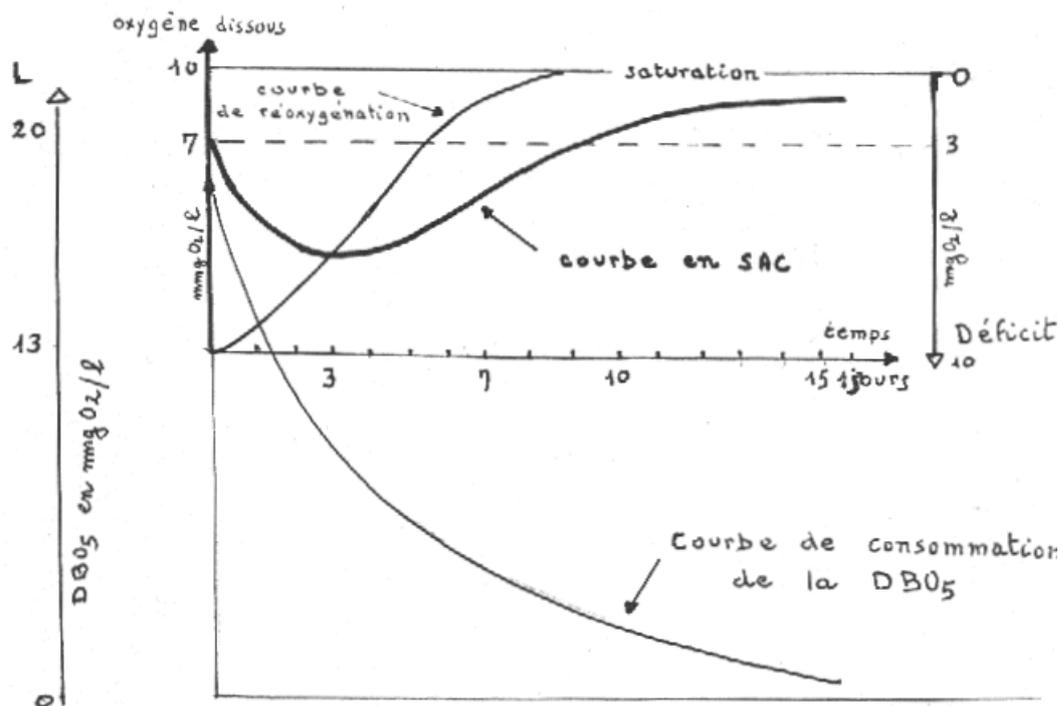
t : temps écoulé depuis l'arrivée du rejet polluant

K<sub>1</sub> : coefficient d'élimination de la DBO<sub>5</sub>

K<sub>2</sub> : coefficient de réaération par la surface

Elle est représentée infra **par la courbe en sac**, différence entre l'absorption d'oxygène et la décroissance de la DBO<sub>5</sub>,

cf. courbe *infra*



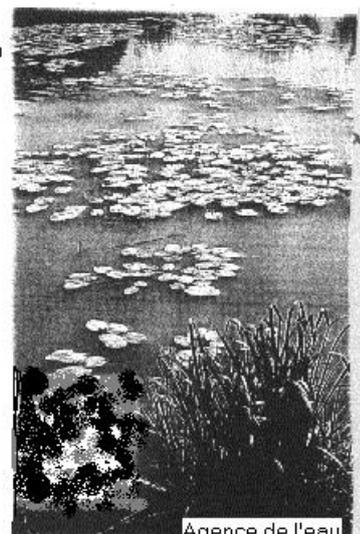
Entpe

Th

## 31. 4 Eutrophisation

### 314. 1 Définition

Un cours d'eau peut être suralimenté en produits nutritifs, notamment en azote et en phosphore, il s'en ensuit alors une prolifération



des végétaux aquatiques (eau verte)

cf. schéma ci-contre

Ces végétaux en mourant, vont constituer un apport nutritif supplémentaire pour les bactéries hétérotrophes qui vont se multiplier en consommant de l'oxygène. L'eutrophisation devient alors une **pollution trophique différée**.

Au stade ultime, le lac devient un marais pestilentiel noirâtre dans lequel l'azote apparaît sous forme d'ammonium, donc mal dégradé et où viennent en surface crever des bulles de méthane.

### 314. 2 Exemple : eutrophisation du Haut-Aveyron

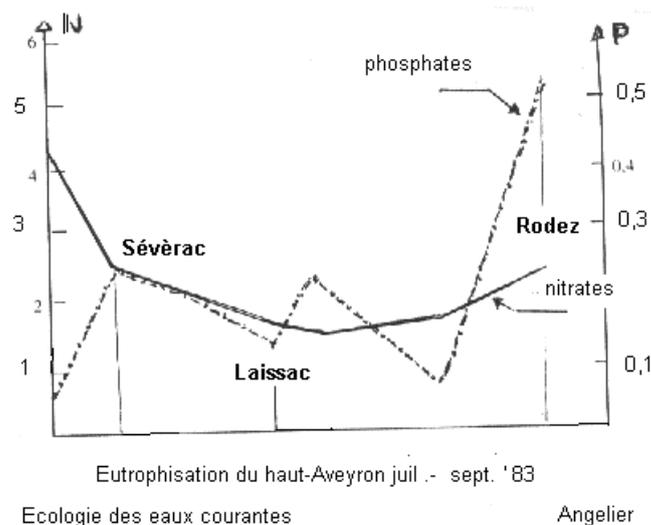
L'Aveyron, tributaire du Tarn, coule dans le sud du Massif Central. La haute vallée s'étend depuis la source (altitude : 710 m) à l'aval de Rodez ( altitude : 490 m ) sur une longueur de 60 km.

Le débit estival de cette rivière à Salmonidés atteint  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  et la pente moyenne 0,3 %. Mais le courant se trouve ralenti par de nombreux biefs.

Des apports **ponctuels** au niveau des agglomérations (environ 55 000 habitants) fournissent 30 % de l'azote et 75 % du phosphore.

Les apports **diffus** érosion du sol et engrais concernent essentiellement l'azote.

Si l'on se réfère aux seules concentrations en azote et phosphore, le Haut-Aveyron doit être considéré comme très eutrophié. Cf. graphique infra



Les **macrophytes** (roseaux, nénuphars...) absents de Sévérac à Laissac occupent 30 % du substratum du lit près de la source et 10 à 50 % de Laissac à l'aval de Rodez. " Nuphear lutea " est considéré comme un indicateur d'eutrophisation.

Ces macrophytes absorbent peu les nutriments de l'eau (N et P) ; ils consomment l'eau du substratum du lit par leurs racines.

Les **algues benthiques** se présentent en forte densité de 32 à 150  $\text{mg}/\text{m}^2$  de chlorophylle en été, le pourcentage de recouvrement du substratum du lit varie de 10 à 60 %. Elles absorbent peu de nitrates, finalement, le travail de dénitrification revient aux bactéries.

La présence de cette végétation entraîne un rejet d'oxygène durant le jour, et l'eau devient sursaturée.

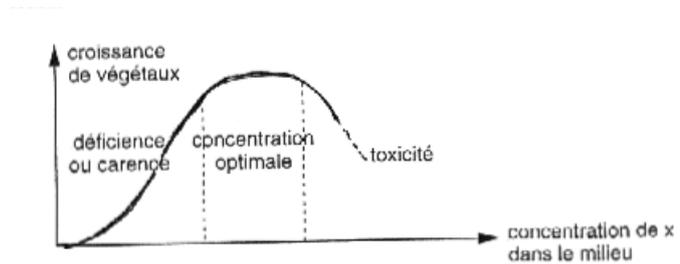
## 32 Effet sur les organismes

### 32.1 Notion de toxicité

A partir d'une certaine concentration certains éléments contenus dans l'eau deviennent toxiques vis-à-vis des êtres vivant dans le milieu.

Cette **notion de dose** apparaît comme fondamentale, car la plupart des éléments deviennent toxiques à partir de certaines doses (y compris le sel, l'oxygène....)

A contrario, l'ensemble des éléments, dits toxiques, ne reste pas en deça d'une certaine quantité et peut même être utile à certaine dose.



Courbe de Mitscherlich

Cf. ci-contre la courbe de Mitscherlich (1909)

On remarque que la croissance est d'abord proportionnelle à la concentration de la substance dans le milieu ; l'on dit alors que x est **facteur limitant**.

L'on atteint ensuite un palier où la croissance devient maximum et indépendante de la **concentration dite optimale**.

Au delà d'une certaine limite, la croissance se présente comme inversement proportionnelle à la concentration : x est alors **toxique**.

### 32. 2 Manifestation de la toxicité directement au niveau de l'espèce

- *la toxicité aiguë* : mortalité violente de toute la population
- *la toxicité subaiguë* : une proportion de la population subsiste
- *la toxicité chronique* : la toxicité n'apparaît qu'après une exposition à de faibles doses présentant un effet annulatif.

### 32. 3 Principes des mesures de toxicité par bio-essais

#### 323. 1 Historique et intérêt de ces mesures

• **Naguère** : Les normes de rejet des eaux résiduaires se trouvaient quasi exclusivement basées sur certains paramètres physico-chimiques tels que : DBO<sub>5</sub>, DCO, conductivité, métaux lourds, détergents, hydrocarbures...) qui donnaient un a priori grossier sur la contamination du milieu récepteur.

Depuis quelques **décennies** : La mesure de l'écotoxicité d'un rejet d'effluent permet d'apprécier a posteriori les effets que ledit rejet peut provoquer sur l'écosystème récepteur.

• **Intérêt** : Les nombreuses méthodes de l'écotoxicologie apparaissent particulièrement appropriées pour, selon les cas :

- prédire les impacts d'un **rejet** sur le milieu récepteur par des mesures sur un écosystème reconstitué.
- apprécier **a posteriori** les effets par des mesures in situ sur des indicateurs biologiques mettant en évidence, soit un effet d'intoxication, soit un effet sur la structure des écosystèmes, soit une contamination de la bio-masse.
- prédire les effets d'un **effluent** sur une station d'épuration.
- **rechercher** les toxiques majeurs pour définir un traitement

#### 323. 2 Paramètres de la mesure de toxicité

Les bioessais ont pour objet la détermination du potentiel toxique d'un effluent ; ils se déroulent en conditions contrôlées sur des organismes élevés ou cultivés en laboratoire.

Les tests de toxicité permettent généralement de tracer une courbe dose / effet (dose s'entendant ici au sens de concentration du toxique dans le milieu de dilution, indiquant l'intervalle de concentrations pour lesquelles l'effet passe de 0 % à 100 %.

Paramètres	Définition	Observations
------------	------------	--------------

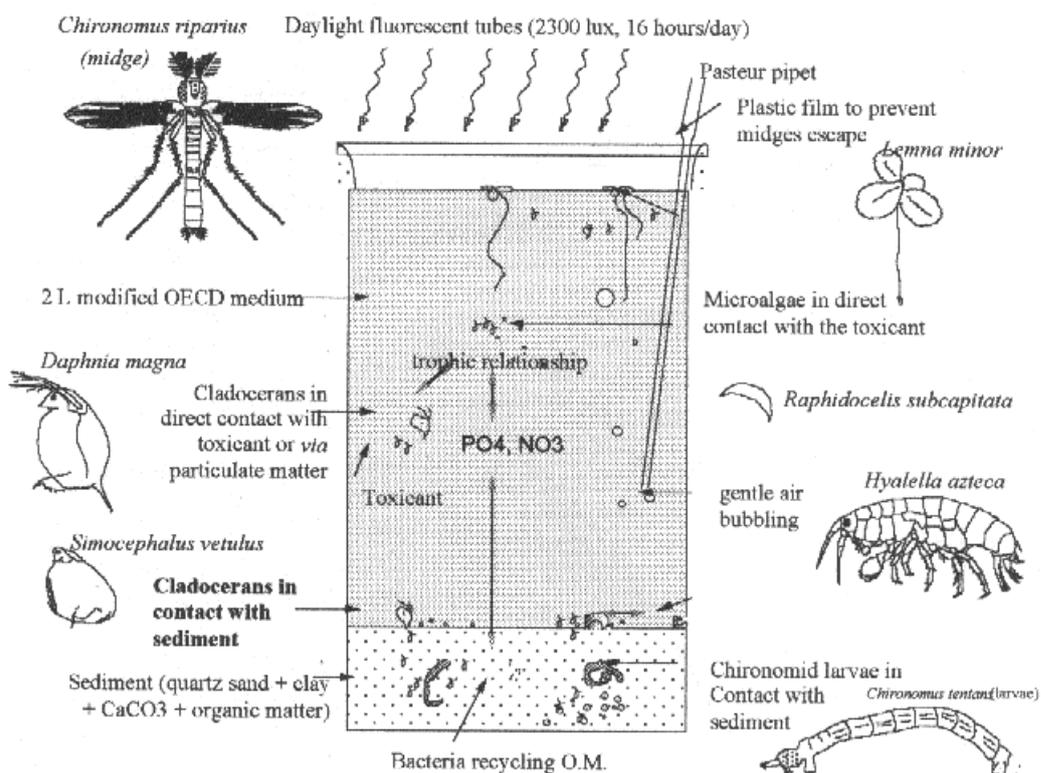
CL 50	toxicité aiguë concentration létale toxique entraînant la mort de 50 % des organismes présents	varie en sens inverse de la toxicité de l'effluent
CI 50	Concentration inhibitrice réduisant de 50 % un processus (croissance, luminescence....)	idem
CE 50	Concentration efficace ayant un effet en tout ou rien sur 50 % des organismes présents (mobilité de daphnies)	idem
TU	Unité toxique pour un effluent égal à $\frac{1}{CL\ 50}$ ou $\frac{1}{CI\ 50}$	varie dans le même sens que la toxicité de l'effluent
LOEC	Toxicité chronique plus faible concentration testée entraînant un effet significatif	Lowest observed effect concentration
NOEC	plus forte concentration testée n'entraînant pas d'effet significatif	no observed effect concentration

### 323. 3 Organismes utilisés comme bio-indicateurs

- **Toxicité aiguë** : on emploie des organismes sentinelles telles que : poissons – microcrustacés (daphnia magna) bactérie
- **Toxicité sub-aiguë** : En ce cas, l'on utilise les microalgues
- **Toxicité chronique** : Cette fois, on a recours aux lentilles d'eau – micro-algues

### 323. 4 Modes de mesure

- In vitro l'on constitue des microcosmes en laboratoire  
cf. schéma infra



- *In situ*, par prélèvement d'échantillons dans le cours d'eau  
Les canadiens pratiquent les deux méthodes

### 323. 5 Exemples

• Station d'épuration

L'inhibition de la respiration des boues activées constitue un moyen de prévoir un **disfonctionnement d'une station d'épuration** provoquée par un effluent toxique.

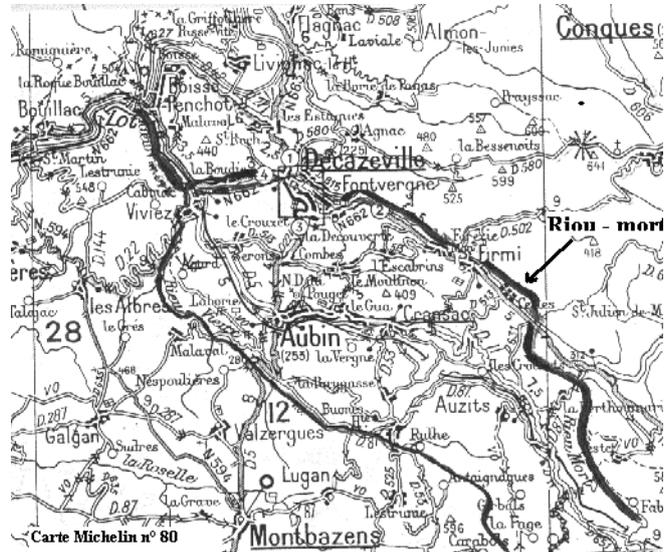
Le test s'effectue par la consommation d'oxygène de la boue activée au moyen d'une électrode. Si les bactéries de la base meurent, la respiration chutera ; cela indiquera la présence d'un élément toxique.

• Riou-Mort

Le Riou-Mort reçoit des pollutions organiques (domestiques) et toxiques. Il draine avec son affluent le Riou-Vieux le bassin industriel de Decazeville avant de se jeter dans le Lot après un parcours de 23 km.

cf. carte infra

Le débit d'étiage < 1 m<sup>3</sup>/s l'été, est constitué à 90 % d'eau d'égout. Le débit moyen s'élève à 2 m<sup>3</sup>/s et le débit de crue à 20 m<sup>3</sup>/s



En amont, le Riou-Mort n'est qu'un ruisseau à substratum de galet et de sable traversant des terres agricoles.

Au km 10, il reçoit les égouts de Firmi ( 1700 Hab.) ; le substratum devient vaseux et apparaissent les bactéries auto-épuratrices.

Après 5 km d'auto-épuración il rentre au km 15 à Decazeville ( 7750 Hab.) dont il reçoit les eaux domestiques ainsi que celles de 2 aciéries qui remontent la température de 7° en été. L'eau s'enrichit en sulfates et prend une teinte brune.

Au km 19, Viviez apporte sa pollution domestique (1650 Hab.) et le Riou-Mort reçoit son tributaire le Riou-Vieux qui transporte les eaux d'égout de 8000 Hab. plus celles d'une usine de zinc, le ph du Riou-Mort tombera de 7,5 à 6,9.

Jusqu'à son confluent km 23, l'eau reste colorée et le substratum couvert d'une vase épaisse.

**32 Effets sur la potabilité de l'eau**

Il s'avère évident qu'au delà d'une certaine dose, les éléments deviennent toxiques et partant, rendent l'eau impropre à la consommation.

Substance toxique	à partir de
arsenic	0,05 mg/l
cyanure	néant
chrome	
plomb	
sélénium	
cadmium	
mercure	0,10 mg/l
nickel	
antimoine	0,05 mg/l

substances indésirables	à partir de
hydrocarbures pesticides	
nitrate	50 mg/l
nitrite	
fer	0,20 mg/l
manganèse	
cuivre	0,10 mg/l
zinc	
fluor	1 mg/l
phénol	5 mg/l
phosphore	1 mg/l
ammonium	
argent	néant
bore	
baryum	
organochlorés	
azote Kjeldhal	
agents de surface	

## La prévention pour la qualité de l'eau

### 1 Préambule

### 2 Actions préventives des schémas d'aménagement et de gestion des eaux

#### 21 Définition d'un SAGE

#### 22 Action par des façons culturales

#### 23 Action par la protection des captages d'eau potable

#### 24 Action par l'aménagement des bassins-versants

#### 25 Action par l'écrêtement des eaux pluviales

#### 26 Action par les plans de risque d'inondation

## 1 Préambule

“ ... Se donner un peu de discipline  
pour sauvegarder ses libertés .... ”

Louis Armand<sup>133</sup>

**D**e tout temps les hommes manifestèrent une propension à gaspiller les biens élémentaires et notamment l'eau. **Dès le 1er siècle de notre ère**, l'empereur Trajan devait interdire aux laboureurs gallo-romains de travailler à proximité de l'aqueduc du Gier amenant l'eau à Lugdunum.  
cf .document infra ( Pierre de Chagnon de 40 après Jésus-Christ)

---

<sup>133</sup> Ingénieur, humaniste, président de la SNCF dans la seconde moitié du XX ème siècle , auteur en 1960 d'un rapport sur la France avec Rueff.

Λ



Aqueduc romain du Gier

EX AVCTORITATE  
IMP CAES TRAJA  
NI HADRIANI  
AVG NEMINI  
ARANDI SER  
ENDI PANG  
ENDIVE IVS  
EST INTRA ID  
SPATIUM AG  
RI QVOD TVTE  
LAE DVCTVS  
DESTINATVM  
EST

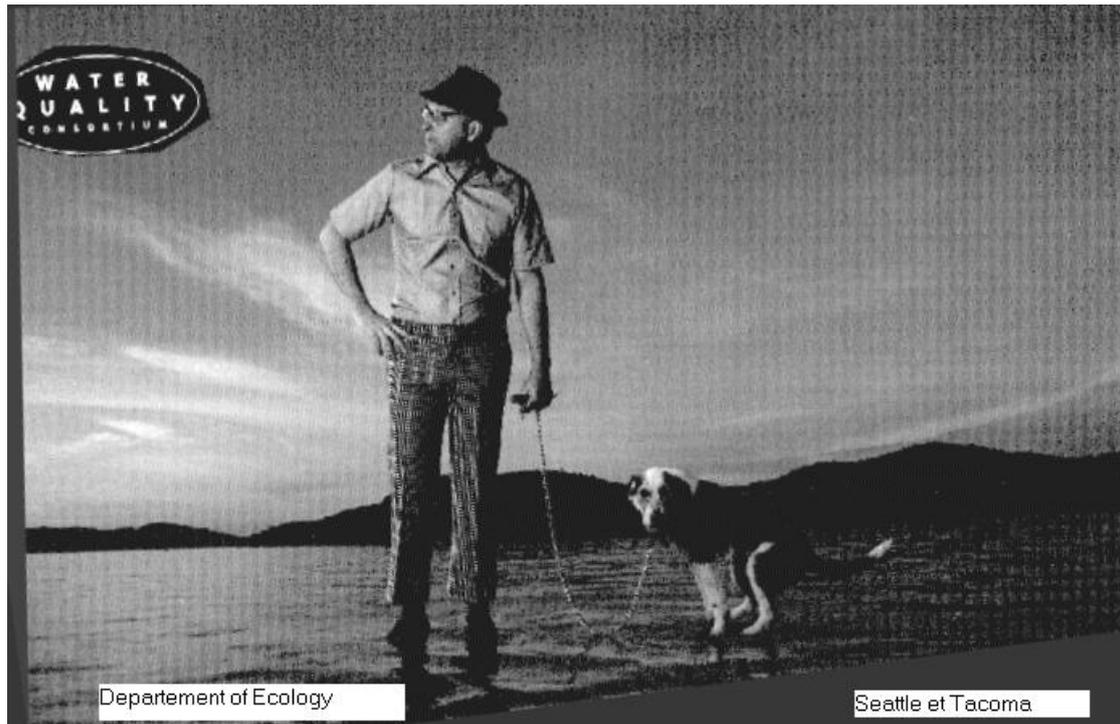
« Par l'autorité de l'Empe-  
reur César Trajan  
Hadrien Auguste, à per-  
sonne n'est accordé le  
droit de labourer, de  
semer ou de planter dans  
cet espace de terrain qui  
est destiné à la protec-  
tion de l'aqueduc. »

40 après Jésus-Christ

**A**u début du **XXème siècle**, devant les ravages dus à la mauvaise gestion de l'eau et à son corollaire l'érosion, le ministère américain de l'agriculture créa le " Soil conservation service" destiné à lutter contre les désastreux résultats illustrés par la photographie infra, montrant un sol battant, latérisé, sans humus .



**E**nfin **cette année, la première du XXIème siècle**, les villes de Seattle et Tacoma aux USA par le truchement de leur service écologique rappelaient aux propriétaires de chiens qu'ils devaient eux aussi veiller à la protection des nappes.  
cf. photographie infra.



**Ces situations, quoique séculaires, ne constituent pas une fatalité !**

Louis Armand, dans l'aphorisme supra, avait indiqué les pistes devant être suivies pour mener des actions préventives, lesquelles devraient reposer sur une discipline tant individuelle que collective.

## **2 Actions préventives des schémas d'aménagement et de gestion des eaux**

**Je mehr Wasser uns zugänglich ist, desto mehr wird es bedroht**<sup>134</sup>

### **21 Définition des schémas d'aménagement et de gestion des eaux**

Nés de la loi sur l'eau de '92, ils correspondent **au bassin-versant** d'un cours d'eau et doivent être soumis aux édiles territoriaux, aux professionnels et aux associations.

Les préconisations du schéma institué se déclinent ainsi :

- lutter contre la pollution agricole,
- protéger la distribution d'eau potable,
- économiser l'eau potable
- mieux épurer les rejets domestiques et industriels,
  
- mesurer les débits et gérer les étiages,
- prévoir et prévenir les crues,
- optimiser la gestion des barrages,
- surveiller l'extraction de matériaux alluvionnaires,
- limiter l'envasement,
- entretenir les cours d'eau,
  
- délimiter les zones humides,

---

<sup>134</sup> Plus l'eau nous est accessible et plus elle est menacée

- prendre en compte les eaux souterraines,  
Les principales actions supra seront déclinées dans les lignes qui vont suivre.

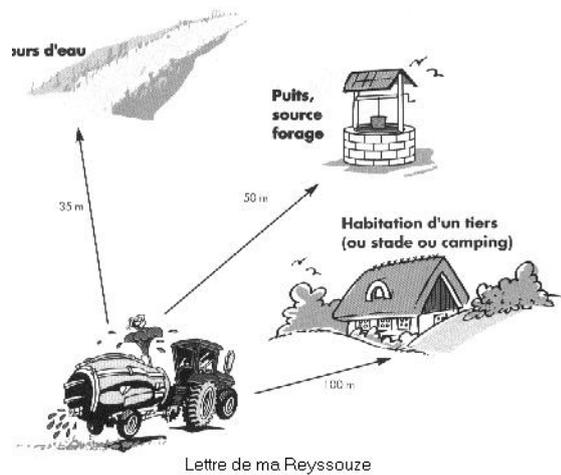
## 22 Par des façons culturales

Elles devraient devenir réfléchies et adaptées au milieu où elles sont pratiquées.  
Ex : l'existence d'une ripisylve entre les cultures d'UNE PART et le cours d'eau d'AUTRE PART devrait devenir systématique.

Dans le dessein d'encourager cette pratique une prime de jachère de 350 € / ha a été récemment créée.



cf. photographie supra



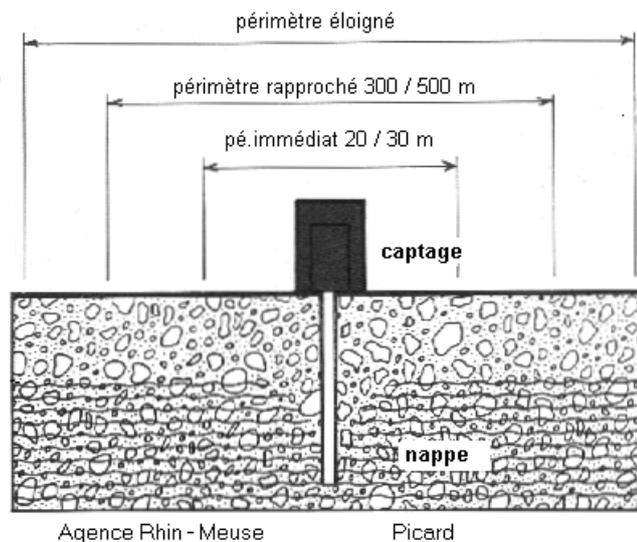
Le respect des distances d'épandages des matières organiques devrait être parfait.

cf. ci-contre schéma desdites distances

100m maison, 75 m rivière, 50m puits

## 23 Par la protection des captages d'eau potable

Vingt siècles après l'empereur Trajan il faut établir des périmètres de protection des captages en plus de ceux des aqueducs.  
cf. schéma ci-contre

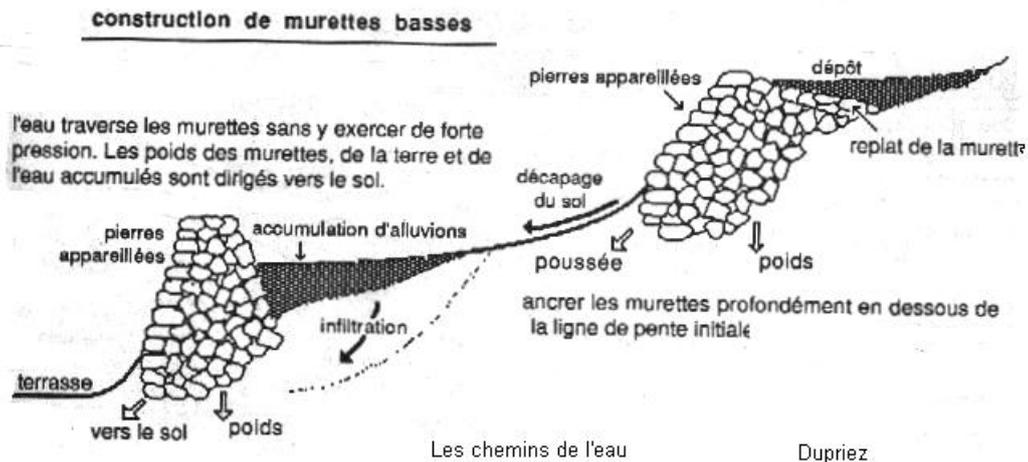


A Madagascar, depuis quelques années l'irrespect de ces protections a entraîné le retour des maladies hydriques telles que la typhoïde, le choléra..... en un an 12 000 personnes ont été atteintes et 1 200 en sont mortes.

## 24 Par l'aménagement des bassins-versants

Il convient de protéger le bassin-versant contre l'érosion, par exemple au moyen de **murettes** placées dans les pentes.

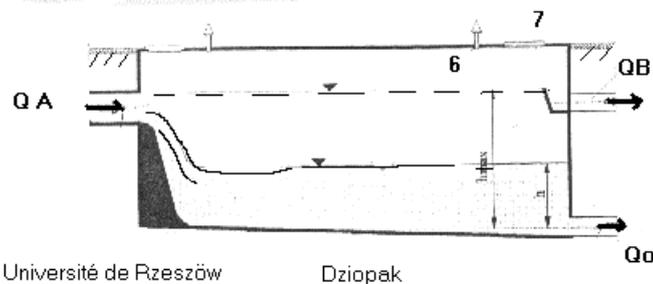
cf. croquis infra



## 25 Par l'écêtement des eaux pluviales

Il a été longtemps négligé le mode de rejet en rivière des eaux pluviales urbaines, source de pollution et de crues. Il importerait donc que ce rejet soit modulé par l'intermédiaire de **bassins de rétention**.

cf. *infra*, dessin d'un bassin urbain.



$Q_A$  : débit maximum entrant dans le bassin, lequel est dimensionné en  $f$  ( la pluie critique retenue)

$Q_0$  : débit sortant du bassin

$Q_B$  : débit de surverse

6 : conduit de ventilation

7 : trou d'homme

## 26 Par les plans de risque d'inondation

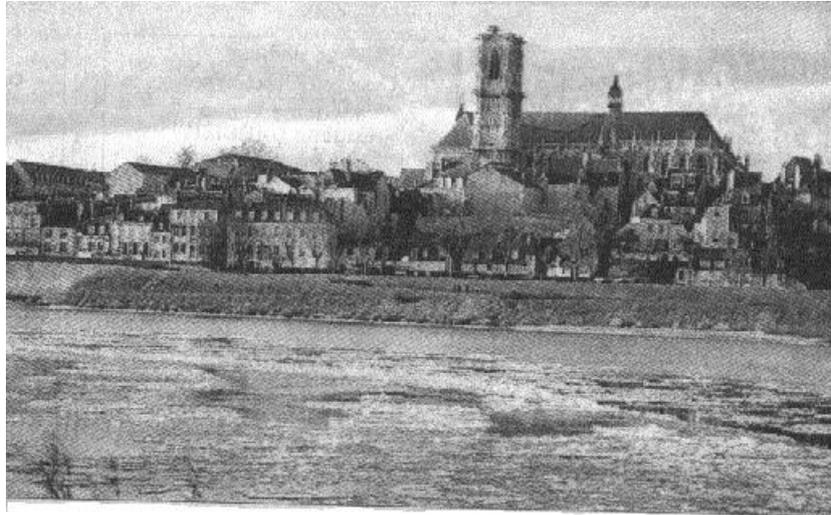
Ces plans, valant servitude d'utilité publique demandent aux propriétaires et aux exploitants de prendre toutes mesures préventives dans les cinq ans suivant leur approbation officielle.

Ils imposent notamment :

- le stockage hors d'eau des produits polluants dangereux,
- l'entretien des arbres hautes tiges

Ces plans définissent selon les zones d'inondation des **aléas**<sup>135</sup>, c'est-à-dire une donnée de **submersion** fonction de la hauteur, de la vitesse et de la durée.

Par exemple à Nevers la levée du quai de Médine, par crue centenaire de la Loire, serait soumise à une intense pression avec rupture possible alors que le fleuve à cet endroit est enserré sur 300 mètres de largeur. cf. photographie *infra*



La Loire à Nevers

Grenot

Les aléas se classent ainsi :

aléa très fort	hauteur submersion $\gt$ 2 mètres et vitesse forte
aléa fort	hauteur submersion $\gt$ 2 mètres et vitesse faible
aléa moyen	1 mètre $\leq$ h submer $\leq$ 2 mètres et vitesse faible ou nulle
aléa faible	hauteur submersion $\leq$ 1 mètre et vitesse faible ou nulle



Zébus et maisons d'adobe (argile) à Madagascar

## En épilogue : une priorité pour le XXIème siècle

Si l'on en croit René Dumont<sup>136</sup> la sécurité alimentaire de la population mondiale constitue un objectif primordial qui ne se trouve pas présentement assuré.

<sup>135</sup> aléa, -ae : dés, puis hasard, risque cf. "alea jacta est" de César, les dés sont jetés

<sup>136</sup> Agronome et économiste, spécialiste du Tiers-monde (1905-2001)

En effet si de 1950 à 1984 s'est développée la "révolution verte" grâce aux sélections de plantes, aux engrais et à l'irrigation... qui entraîna une augmentation de la production agricole supérieure à la croissance démographique, cette tendance s'est inversée depuis !

De nos jours, **le manque d'eau** apparaît comme l'une des causes de ce recul combinée par les dérèglements climatiques et les inégalités nord-sud. Ainsi 1, 3 milliards de personnes dans le monde ne disposeraient pas d'eau vraiment potable en quantité suffisante.

Cela donne donc une idée de l'immensité de la tâche devant être accomplie si l'on veut infléchir enfin la courbe du **manque d'eau** et, partant, celle de la **malnutrition**.



## **Exercices d'hyétologie potamologie avec corrigés**

---

**n°1 : rayon hydraulique- nbre de Froude- rugosité- débit seuil épais**

**n°2 : temps de retour- coefficient de ruissellement- débit de pointe**

**n°3 : mesure de débit en rivière- déversoir rectangulaire- moulinet**

**n°4 : pluviographe - intensité durée période de retour- débit solide**

**n°5 : pluviométrie-tarissement rivière- hyétogramme- hydrogramme**

**n°6 : sédimentation-barrage-périmètre mouillé-nbre Froude- régime**

**n°7 : probabilité des pluies - pluviométrie par méthode des isohyètes**

**n°8 : pluviométrie-période de retour quinquennale-formule de Caquot**

**n°9 : bassin-versant-intensité pluviométrique-coefficient écoulement**



## Exercice n° 1 hyétologie potamologie

### Rayon hydraulique - nombre de Froude – rugosité – débit – seuil épais

#### 1

En rivière le nombre de Froude s'écrit  $F = \frac{u}{\sqrt{gR}}$  ( R : rayon hydraulique et u : vitesse)      oui      non

Si  $F < 0,08$  la glace de rive se dépose, si  $F > 0,6$  l'érosion des berges se manifeste      oui      non

La force tractrice  $\tau = \rho g R i$  ( i : pente) représente la force érosive de la rivière      oui      non

Influence d'un endiguement sur un lit affouillable  
( pouvant se creuser) d'une rivière charriant fort  
peu de sédiments



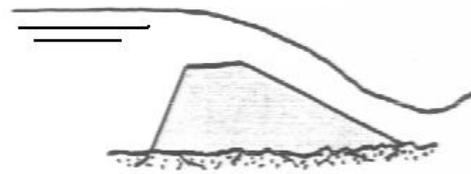
exercicehydroptal

Bouloc

L'endiguement augmentant la vitesse, l'érosion du fond apparaîtra      oui      non

En rivière les seuils trapézoïdaux ou chaussées se rencontrent fréquemment

Seuil épais à profil en long trapézoïdal fréquent en rivières



$$0,35 < \mu < 0,40$$

exercicehydroptal

Boulac

Le débit qu'ils laissent passer est donné par une formule de type :

$$Q = \mu L \sqrt{2g} h^{3/2} \quad L : \text{largeur déversante, } h : \text{tirant d'eau amont en crête}$$

oui non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

## 2

### Canal de dérivation éclusée de Donzère Mondragon

Aux confins de la Drôme et de l'Ardèche un canal de dérivation éclusée a été construit à partir du Rhône à Donzère.

Il s'agit d'un canal en terre revêtu d'un béton bitumineux au voisinage de la surface dans le dessein de lutter contre les effets du batillage.

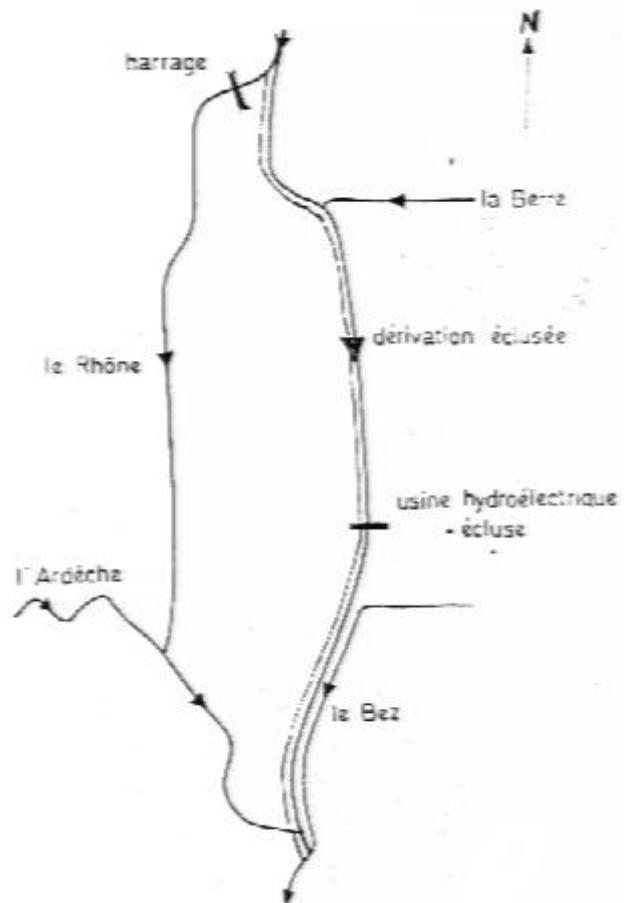
Cf. carte ci-contre

A partir d'essais effectués à Kembs sur le Rhin l'on connaît son coefficient de Chézy : 62,5  
ce coefficient fonction des berges et du fond s'écrit :  $u = C \sqrt{R i}$

Sachant que la vitesse maximum est fixée à  $u = 1,30$  m/seconde en raison de l'érosion des berges

il a été établi les dimensions suivantes :

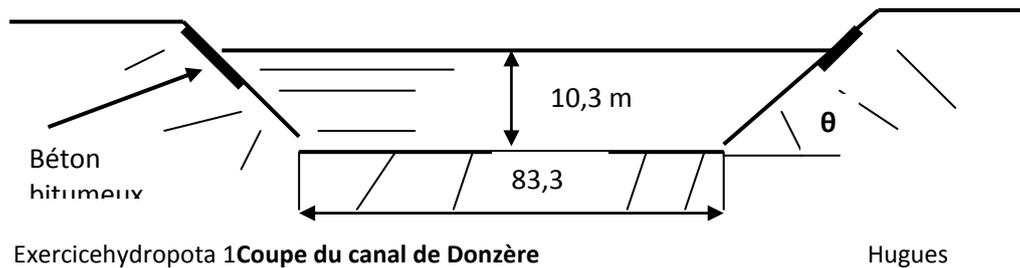
$$h = 10,3 \text{ mètres} \quad b = 83,3 \text{ mètres} \\ \text{tg } \theta = 1/3$$



exercicehydroptal

Hugues

Lesquelles dimensions figurent sur la coupe infra :



- 21** Calculer la surface mouillée  $\omega$   
Calculer le périmètre mouillé  $\chi$   
Calculer le rayon hydraulique  $R = \frac{\omega}{\chi}$
- 22** Vérifier que le nombre de Froude, en rivière  $F = \frac{u}{\sqrt{gR}}$ , reste  $\leq 0,6$  pour éviter l'arrachement des berges par la force tractrice
- 23** En appliquant la formule de Bazin  $C = \frac{87}{1 + \gamma / \sqrt{R}}$  vérifier que le coefficient de rugosité  $\gamma$  reste voisin de l'unité
- 24** Calculer la pente de ce canal avec une vitesse  $u$  de 1,3 m/ seconde
- 25** Vérifier que le débit peut atteindre 1 500 m<sup>3</sup>/ seconde avec la vitesse supra

## Corrigé de l'exercice n° 1 hydrologie potamologie

### 1

- En rivière le nombre de Froude s'écrit  $F = \frac{u}{\sqrt{gR}}$  (  $R$  : rayon hydraulique et  $u$  : vitesse)  ou  non
- Si  $F < 0,08$  la glace de rive se dépose, si  $F > 0,6$  l'érosion des berges se manifeste  ou  non
- La force tractrice  $\tau = \rho g R i$  ( $i$  : pente) représente la force érosive de la rivière  ou  non
- Influence d'un endiguement sur un lit affouillable ( pouvant se creuser) d'une rivière charriant fort peu de sédiments ,
- L'endiguement augmentant la vitesse l'érosion du fond apparaîtra  ou  non
- En rivière les seuils trapézoïdaux ou chaussées se rencontrent fréquemment,
- Le débit qu'ils laissent passer est donné par une formule de type
- $Q = \mu L \sqrt{2g} h^{3/2}$   $L$  : largeur déversante,  $h$  : tirant d'eau amont en crête  ou  non

## 2

### Canal de dérivation éclusée de Donzère Mondragon

#### 21

Calcul de  $\omega$  :

$$\begin{aligned}\omega &= h (b + h \cotg \theta) \\ &= 10,3 (83,3 + 10,3 \cdot \cotg \theta) \text{ avec } \cotg \theta = 3 \\ &= 1\,176 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Calcul de  $\chi$  :

$$\begin{aligned}\chi &= b + \frac{2h}{\sin \theta} \text{ avec } \theta = 18^\circ \sin \theta = 0,31 \\ \chi &= 83,3 + \frac{2 \cdot 10,3}{0,31} \\ \chi &= 149,7 \text{ mètres}\end{aligned}$$

Calcul de R :

$$\begin{aligned}R &= \frac{\omega}{\chi} \\ R &= 7,8 \text{ mètres}\end{aligned}$$

#### 22

Vérification du nombre de Froude

$$F = \frac{u}{\sqrt{gR}}$$
$$F = \frac{1,3}{\sqrt{9,8 \cdot 7,8}}$$
$$F = 0,14 \quad \text{c.q.e.v.}$$

**23**

Vérification du coefficient de rugosité

$$C = \frac{87}{1 + \gamma/\sqrt{R}}$$
$$\gamma = \sqrt{R} \frac{87 - 62,5}{62,5}$$
$$\gamma = 1,10 \quad \text{c.q.e.v.}$$

**24**

Calcul de la pente du canal

$$i = \frac{u^2}{C^2 R}$$
$$i = \frac{5}{100\,000}$$

**25**

Vérification du débit

$$Q = u \cdot \omega$$
$$= 1\,530 \text{ m}^3 / \text{seconde} \quad \text{c.q.e.v.}$$

## Exercice n° 2 hydrologie potamologie

### Période de retour – coefficient de ruissellement – débit de pointe

**1** La période de retour d'une pluie de durée  $d$  est calculée à partir :

de l'intensité moyenne	oui	non
de l'intensité maximale sur divers pas de temps	oui	non

Plus un bassin-versant présente de surfaces urbanisées

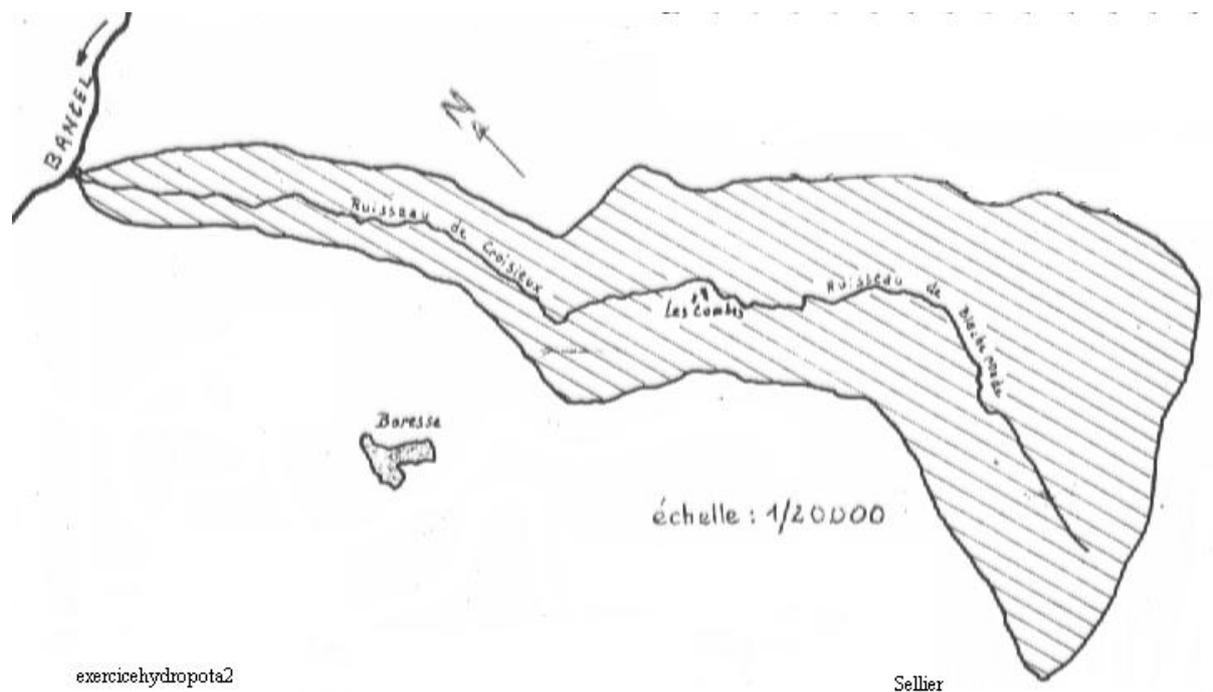
et plus la vitesse d'écoulement vers l'exutoire est élevée    oui    non

Pour une même surface plus la compacité du sol est grande

et plus le débit de pointe sera élevé    oui    non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

## 2 Le ruisseau de Croisieux, tributaire du Bancel lui-même affluent du Rhône sis en Drôme



nord, peut être divisé en deux biefs d'aspect différent, cf. carte.

La partie amont (dite ruisseau de Blacheronde) est très ravinée et très peu boisée ; le sol relativement imperméable ; les pentes sont très fortes et la pente du lit s'avère elle-même très importante puisque atteignant 47/00 (quarante-sept pour mille), et le lit lui-même est relativement imperméable.

En aval le ruisseau de Croisieux traverse un étranglement boisé dont les pentes sont plus faibles surtout dans la partie ouest du lit mais dont les sommets du vallon sont peu élevés par rapport au ruisseau. Dans cette portion la pente est relativement plus modérée atteignant 30 /00 (trente pour mille).

Compte tenu de ce que la plus grande partie du bassin-versant se trouve dans la partie amont, nous adopterons des **coefficients identiques** sur tout le cours du ruisseau, la surface devra être considérée comme argileuse compacte avec cultures

Le bassin-versant est de 380 ha = 3,80 km<sup>2</sup>

La pente moyenne totale est de 38 /00 = 0,38

La longueur du cours d'eau est de 5 km

### Questions

Déterminer le débit de crue décennale (débit de pointe ou débit maximal)  
après avoir, au moyen des tableaux et abaques ci-joint, déterminé :

### 21

Le coefficient d'écoulement (ruissellement) C

## 22

Le coefficient de forme  $\varphi$  ( déterminé par  $L \sqrt{A}$  )

## 23

Le coefficient de lit  $C_l$  (infiltration dans le lit)

## 24

Donner d'abord le débit de pointe brut puis le débit de pointe corrigé  $Q_{10}$  par les coefficients de forme, de bassin rural et de lit.

Annexes : Tableau des valeurs de C, de  $C_l$ ,  $v$ ,

P.J : abaque de Caquot Drôme nord format A<sub>3</sub>

### Annexe n° 1 : valeurs du coefficient d'écoulement " C "

Nature des surfaces	Exemple de référence	C
Villes à habitations très denses (toitures, chaussées et trottoirs modernes) Sols à roches non fissurées. Terrains volcaniques	Ville de Valence	0,90
Villes à habitations denses. Paysages à larges joints. Trottoirs en terre battue. Villages où l'assainissement est moderne.	Ville de Bourg-de-Péage	0,60

Sols "battants" d'argile compacte ou sols très alcalins sans cultures.

Villes à habitations moins denses avec espaces verts assez fréquents. Villages où l'assainissement est partiel mais où les voies sont imperméabilisées.	Ville de Malissard	0,50
Villes ou villages avec voies non imperméabilisées Sols argileux compacts avec cultures céréalières		0,40
Sols argileux ou argileux-sableux avec cultures maraîchères		0,35
Sols sableux-argileux sans cultures		0,30
Quartiers résidentiels avec larges espaces verts Sols sableux-argileux avec cultures céréalières ou avec plantations fruitières aérées. Terrains en friches.		0,20
Sols sableux-argileux friables Couverture de broussailles. Prairies Plantations fruitières denses.		0,15
Sols sableux, caillouteux, ou gravo-sableux Plantations et vergers très denses. Prairies riches assez pentues. Forêts peu denses en futaie. Terres à bruyère, chênes-nains, etc.		0,10
Sols sableux protégés par taillis Sols marno-calcaires altérés. Luzernières à faible pente. Forêts avec taillis. Bas-fonds marécageux.		0,08
Sols sableux non protégés. Forêts très denses. Sols très marécageux.		0,05

## Annexe n° 2

### Valeur du coefficient de lit " C<sub>l</sub> " (bassins ruraux)

nature du lit	exemple de référence	" C <sub>l</sub> "
<u>Lit imperméable</u> dans rocher non fissuré ou argile compacte. Lit torrentiel avec forte pente	Torrents du Vercors	0,85
<u>Lit relativement imperméable</u> dans rocher fissuré, calcaire, ou lit colmaté par	Croisieux	0,70

particules fines : argile ou kaolin  
Couche d'argile à faible profondeur  
Nappe stable au-dessus du lit de la rivière  
Pente assez forte

Lit relativement imperméable 0,60  
Sols argileux-sableux, sables et graviers peu colmatés  
Eaux très troubles en période de crue  
Pente moyenne  $\approx$  de 1 %  
Nappe au-dessus du lit alimentée par la rivière  
en période de hautes eaux.

Lit perméable 0,50  
Graviers ou galets peu colmatés  
Peu de sédiments en période de crue  
Pente moyenne  
Nappe alimentée normalement par la rivière

### Valeur du coefficient de forme du bassin-versant " v "

L / $\sqrt{A}$	1	1,25	1,50	2	2,50	3	4
v	1,50	1,30	1,20	1	0,90	0,80	0,70

## Corrigé de l'exercice n° 2 hydrologie potamologie

### 1

La période de retour d'une pluie de durée  $d$  est calculée à partir :  
de l'intensité moyenne

oui

non

de l'intensité maximale sur divers pas de temps

oui

non

Plus un bassin-versant présente de surfaces urbanisées  
et plus la vitesse d'écoulement vers l'exutoire est élevée

oui

non

Pour une même surface plus la compacité du sol est grande  
et plus le débit de pointe sera élevé

oui

non

### 2

21 terres argileuses relativement imperméables, peu boisées avec de fortes pentes, cultures variées ne retenant que faiblement les écoulements superficiels  $C = 0,40$

**22** nous avons  $\frac{L}{\sqrt{A}} = \frac{5}{\sqrt{3,8}} = \frac{5}{1,95} = 2,50$   
nous pouvons prendre  $v = 0,90$

**23** Le lit relativement imperméable et la forte pente nous inciteront à prendre  $C_i = 0,70$

**24** L'abaque Drôme zone Nord donne directement pour :

$A = 380 \text{ ha}$                        $i = 0,038$                       et                       $C = 0,40$

$$Q = 14 \text{ m}^3 / \text{sec.}$$

Appliquons maintenant les correctifs supra , il vient :

$$Q_{10} = Q \cdot 0,91 \cdot v \cdot C_i$$

$$Q_{10} = 8 \text{ m}^3 / \text{sec.}$$

## Exercice n° 3 hydrologie potamologie

### Mesure de débit en rivière – déversoir rectangulaire - moulinet

#### 1

Quelles sont les conditions à remplir pour installer une station de jaugeage (mesure de débits en rivière) ?

-l'écoulement doit être uniforme et permanent	oui	non
-la station doit être accessible en cas de crue	oui	non
-le site doit être dégagé et ensoleillé	oui	non
-à une faible variation de débit doit correspondre une grande variation de hauteur d'eau	oui	non

*Cerclez les réponses qui vous estimez justes*

A quelles définitions correspondent les termes infra .

Echelle limnimétrique    **A**                      Point de jaugeage    **D**  
Station limnigraphique    **B**                      Station de jaugeage    **C**

Site où l'on peut élaborer une chronique de débits ..... ?

Site où l'on réalise des mesures instantanées de débit..... ?

Site sur lequel est pratiqué un enregistrement continu des hauteurs .... ?

Site sur lequel est pratiqué une observation des hauteurs .... ?

*Mettez la bonne lettre en face*

## 2

A l'aide des 37 mesures concomitantes hauteur d'eau H et débit Q effectuées à la station de jaugeage de Mbakaou au Caméroun sur la rivière Djerem affluent de la Sanaga :

**21.** On vous demande d'ajuster ces mesures à l'aide d'une courbe, c'est-à-dire, de construire graphiquement les couples hauteur d'eau / débit .

### Piste

axe des y : débit avec 3 cm pour représenter  $500 \text{ m}^3 / \text{sec}$

axe des x : hauteur d'eau avec 4 cm pour représenter 100 cm

date	hauteur d'eau (cm)	débit ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
2 déc. ' 59	186	261
10 janv. ' 60	118	118
17 mars '60	42	26
22 avril ' 60	129	136
22 nov. ' 60	271	451
14 déc. ' 60	208	264
30 mars ' 61	45	27
18 juil. ' 61	305	578
19 juil. '62	261	423
26 août ' 62	411	936
21 sept. ' 62	483	1 207
24 sept. ' 62	501	1 309
15 déc. ' 62	192	258
14 fév. ' 63	95	86
5 mars ' 63	84	71
9 sept. '63	461	1 152
28 sept. ' 63	430	1 007
30 sept. ' 63	448	1 066
10 oct. ' 63	508	1 365
11 mars ' 66	45	28
3 fév. '67	98	81
17 mars ' 67	52	33

16 sept. ' 67	415	930
24 sept. ' 67	414	898
27 sept. ' 67	402	850
28 sept. ' 67	414	900
29 sept. ' 67	424	937
30 sept. ' 67	433	965
7 oct. ' 67	450	1 052
9 oct. ' 67	461	1 100
10 oct. ' 67	477	1 180
21 oct. ' 67	427	966
28 oct. ' 67	322	578
12 nov. ' 67	252	388
13 nov. ' 67	244	369
4 déc. ' 67	177	206
7 déc. 67	171	189

**22** Est-ce que cette courbe de tarage peut être utilisée pour estimer le débit de l'année 2 003 ?

non oui mais ..... sous réserve de  
vérifier que la section hydraulique de contrôle n'ait pas changé entre la dernière date d'établissement (en 1966 ) de la courbe de tarage et l'année 2 003

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

**23** Sachant qu'après passage au logarithme et calcul de la pente l'on obtient une formule de débit

$$Q = 0,086 h^{3/2} \text{ pour } h \leq 200 \text{ cm}$$

Peut-on dire que la section de jaugeage est de type déversoir de Bazin, c'est-à-dire, rectangulaire.

oui non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

**3**

Un jaugeage au moulinet a été effectué sur une rivière

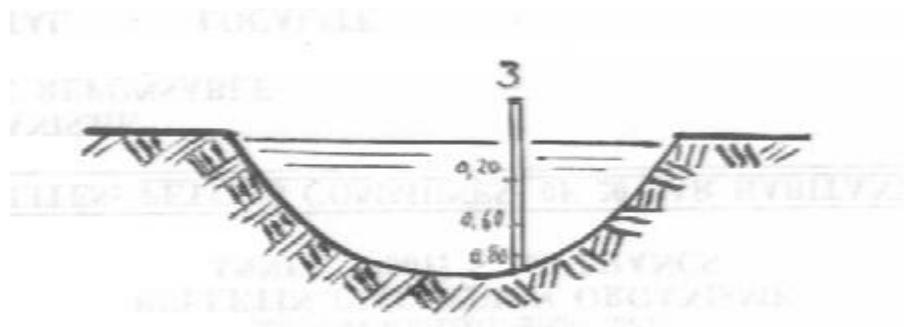
selon plusieurs verticales, en particulier sur la verticale n°3

à : 0,2 m

0,6 m

0,8 m

en dessous de la surface



cf. croquis ci contre

Le tableau infra indique les résultats obtenus sur ladite verticale

nombre points de mesure dans verticale	abscisse (m) depuis rive gauche	profondeur (m)	cote moulinet depuis surface (m)	nombre de tours de l'hélice	durée de la mesure (s) au moulinet
3	2,4	1	0,2	15	50
			0,6	20	50
			0,8	10	50

Sachant que la droite d'étalonnage du moulinet est déterminée par :  $V = 2 N$  avec  $V$  la vitesse du courant (m/s) et  $N$  le nombre de tours de l'hélice/ seconde

**31** Calculez  $N$  le nombre de tours d'hélice par seconde à 0,2, à 0,6, à 0,8 m de profondeur.

**32** Calculez la vitesse  $V$  à 0,2, à 0,6, à 0,8 m de profondeur

**33** Calculez la vitesse moyenne dans cette verticale sachant que

$$V_{\text{moyenne}} = 0,25 (\text{vitesse à } 0,2 \text{ m}) + 0,5 (\text{vitesse à } 0,6 \text{ m}) + 0,25 (\text{vitesse à } 0,8 \text{ m})$$

**34** Calculez le débit dans cette verticale en multipliant la vitesse moyenne par la surface attribuée à la verticale soit  $1,8 \text{ m}^2$

## Corrigé de l'exercice n° 3 hydrologie potamologie

**1** Quelles sont les conditions à remplir pour installer une station de jaugeage (mesure de débits en rivière) ?

-l'écoulement doit être uniforme et permanent

ou  non

-la station doit être accessible en cas de crue

ou  non

-le site doit être dégagé et ensoleillé

oui  non

-à une faible variation de débit doit correspondre une grande variation de hauteur d'eau

ouiii  non

*Cerclez les réponses qui vous estimez justes*

A quelles définitions correspondent les termes infra .

Echelle limnimétrique **A** Point de jaugeage **D**  
Station limnigraphique **B** Station de jaugeage **C**

Site où l'on peut élaborer une chronique de débits ...**C**.... ?

Site où l'on réalise des mesures instantanées de débit.....**D**.... ?

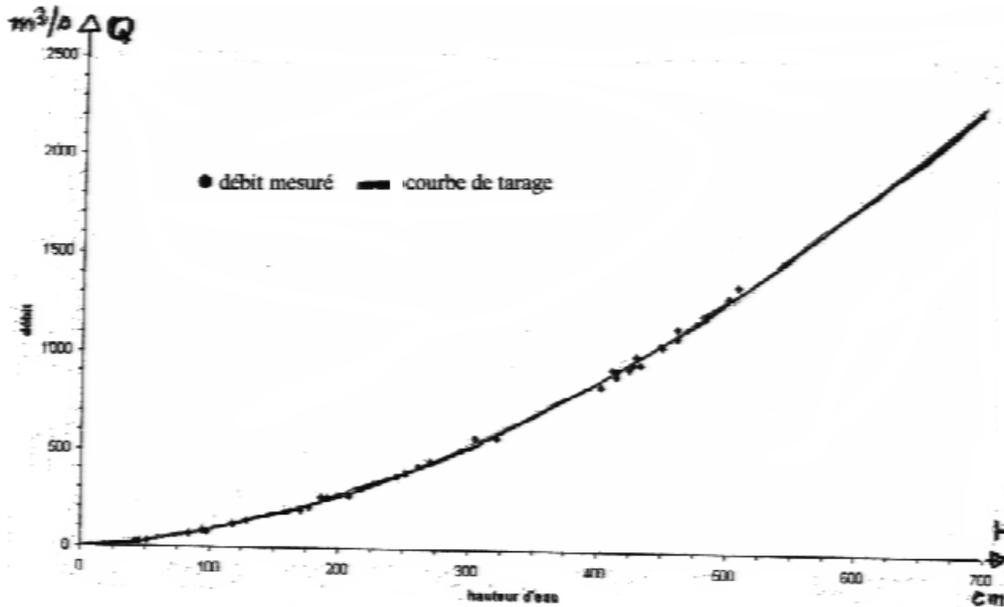
Site sur lequel est pratiqué un enregistrement continu des hauteurs ...**B**.. ?

Site sur lequel est pratiqué une observation des hauteurs ...**A**. ?

*Mettez la bonne lettre en face*

**2**

**21** Courbe du débit en fonction du tirant d'eau de la Djérem ( Cameroun)



exercicehydropta3

Musy

**22** Est-ce que cette courbe de tarage peut être utilisée pour estimer le débit de l'année 2 003 ?

non

Oui

..... sous réserve de vérifier que la section hydraulique de contrôle n'ait pas changé entre la dernière date d'établissement (en 1966 ) de la courbe de tarage et l'année 2 003

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

**23** Sachant qu'après passage au logarithme et calcul de la pente l'on obtient une formule de débit

$$Q = 0,086 h^{3/2} \text{ pour } h \leq 200 \text{ cm}$$

Peut-on dire que la section de jaugeage est de type déversoir de Bazin, c'est-à-dire, rectangulaire.

Oui

oui  n

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

**3**

**31** Nombre de tours d'hélice par seconde

à 0, 20 m

$$15/50 = 0,3$$

0,60 m

$$20/50 = 0,4$$

0,80m                       $10/50 = 0,2$

**32** Vitesse de l'hélice

à 0,20 m                       $V_1 = 0,3 \cdot 2 = 0,6 \text{ m/s}$

0,60 m                       $V_2 = 0,4 \cdot 2 = 0,8 \text{ m/s}$

0,80 m                       $V_3 = 0,2 \cdot 2 = 0,4 \text{ m/s}$

**33** Vitesse moyenne dans la verticale

$$V_m = 0,25 \cdot V_1 + 0,5 \cdot V_2 + 0,25 \cdot V_3$$

$$V_m = 0,65 \text{ m/sec.}$$

**34** Débit si la section mouillée de la verticale =  $1,8 \text{ m}^2$

$$Q = 0,65 \cdot 1,8$$

$$Q = 1,17 \text{ m}^3/\text{sec}$$

## Exercice n° 4 hydrologie potamologie

### Pluviographe– courbes intensité- durée- période de retour- débit solide

**1** L'enregistrement de la grandeur hydrologique infra, ne porte pas de légende en ordonnée.

De quelle grandeur hydrologique s'agit-il ?

Précipitations

évaporation

infiltration



30'	103	78	74	57	52	43	39	38	34	32
45'	81	68	47	37	36	28	26	26	25	23
60'	71	56	42	32	27	24	23	21	19	18

**51** Dresser un tableau donnant les intensités en mm/h en fonction de la durée de référence : 6', 15', 30', 45', 60' et de la période de retour T : 10 ans, 2 ans, 1 an.

Après avoir calculé pour chaque temps de retour la probabilité de dépassement associée à l'intensité critique retenue

**Pistes**

$$\text{Temps de retour} = \frac{1}{\text{Probabilité de dépassement d'une intensité critique}}$$

$$\text{Probabilité} = \frac{\text{nombre de cas où l'événement s'est produit}}{\text{nombre de cas où il aurait pu se produire}}$$

Pour une durée d'averse donnée, ex : 6', la plus grande intensité observée 152 mm/h présente une probabilité de dépassement de 1 fois en 10 ans, correspondant à une probabilité de 0,1.

Le temps de retour étant l'inverse de la probabilité de dépassement, il devient donc égal à 1 soit ... 10 ans.

0,1

De même pour la 5<sup>ème</sup> intensité critique, toujours pour 6', l'intensité observée 96 mm/h présente une probabilité de dépassement, supérieure à la précédente, de 5 fois en 10 ans, puisque 5 intensités critiques lui sont supérieures en 10 ans (inclure 96 mm/h dans le compte des intensités supérieures).

Cela correspond à une probabilité de 5 soit 0,5. Le temps de retour devenant 1 soit ..... 2 ans

10

0,5

**52** Représenter graphiquement les résultats :

52.1 Par les courbes  $i = f(T)$  pour les durées d'averses de 6' et de 30'

Porter en abscisse T, temps de retour 1, 2 et 10 ans et en ordonnées les intensités critiques correspondantes, l'on obtiendra donc 2 courbes.

52.2. Par les courbes  $i = f(t)$  pour la période de retour T = 10 ans et pour T = 2 ans

Porter - sur la même feuille - en abscisse les différentes durées d'averse 6', 15', 30', les ordonnées (intensités critiques correspondantes) ne changeant pas. L'on obtiendra deux courbes de forme :

$$i(t) = a (t_p)^n \text{ avec } n < 0 \text{ courbe décroissante}$$

qui pourrait devenir une droite en prenant le logarithme

$$\ln i = \ln a + n \ln t_p$$

## Corrigé de l'exercice n° 4 hydrologie potamologie

**1**

L'enregistrement de la grandeur hydrologique infra, ne porte pas de légende en ordonnée.

De quelle grandeur hydrologique s'agit-il ?

Précipitations

évaporation

infiltration

**2**

Comment s'appelle l'instrument utilisé pour mesurer la grandeur hydrologique de la question précédente ?

Pluviographe à auget

balance d'évaporation

infiltromètre

### 3

Afin de jauger une rivière très torrentielle de débit voisin de 200 litres /seconde quelle méthode utiliseriez-vous ?

Jaugeage au sel avec sonde

ou

jaugeage avec un parshall ( canal venturi)

### 4

En sédimentologie fluviale pour savoir si un matériau ( par ex : gravier) est entraîné par le courant , l'on se fonde :

SOIT sur la force tractrice (  $\text{kg/ m}^2$  )  $\tau = \rho g R i$ , avec R rayon hydraulique , i : pente ,  $\rho g = 1000$

si  $\tau > \tau_c$  force tractrice critique donnée par des tables, le matériau est entraîné

SOIT sur la vitesse critique d'entraînement du matériau  $U_c$  donnée par des tables

si la vitesse de l'eau  $U > U_c$  le matériau sera entraîné

ou

non

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

### 51

Tableau des intensités critiques en mm / h en fonction de :

la durée des averses

la période de retour

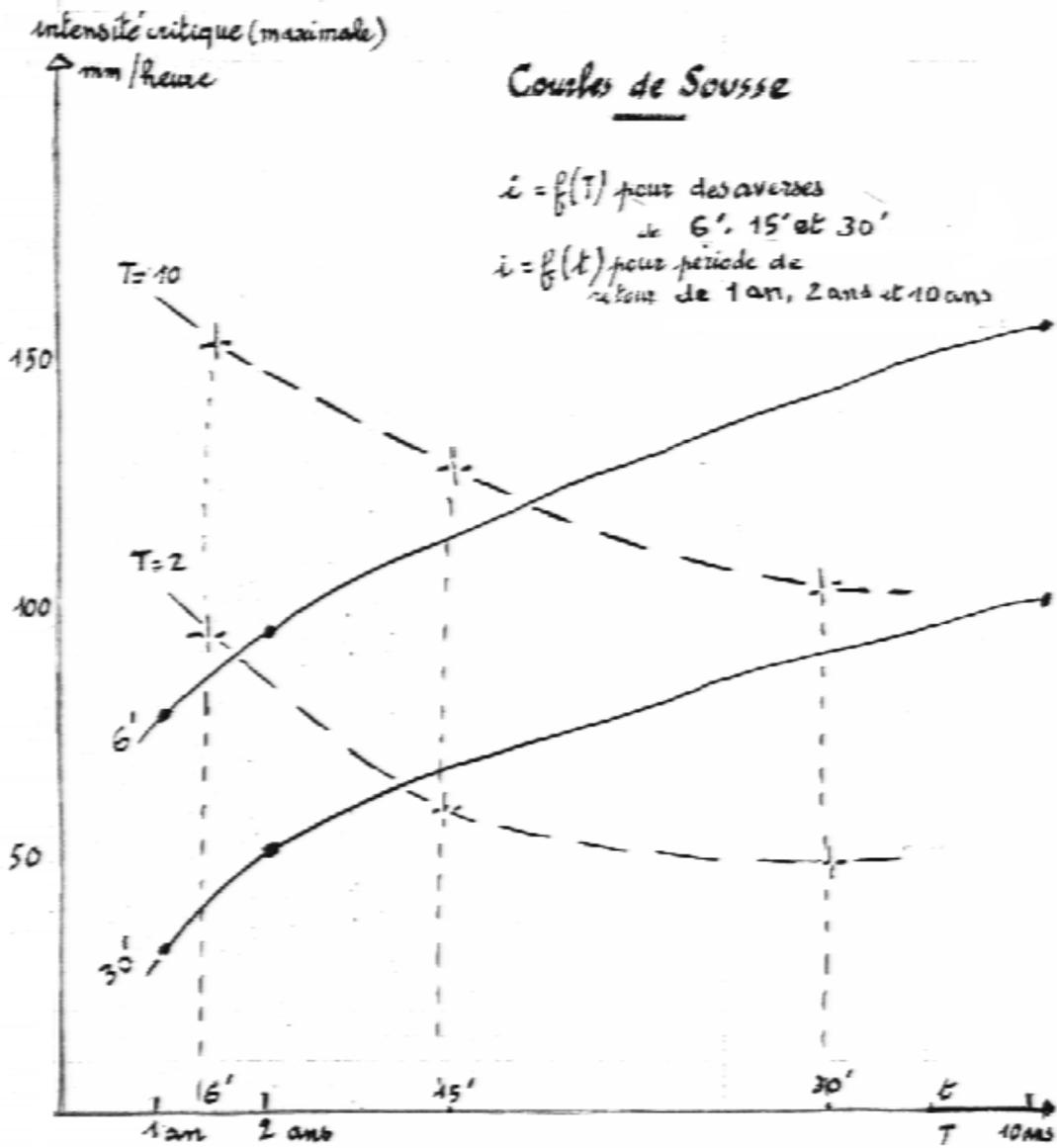
Durée de l'averse en minutes	Période de retour en années		
	T = 1 an	T = 2 ans	T =10 ans
t = 6 minutes	78 mm / h	96 mm / h	152 mm / h
t =15 minutes	47 mm / h	60 mm / h	130 mm / h
t = 30 minutes	32 mm / h	52 mm / h	103 mm / h
t = 45 minutes	23 mm / h	36 mm / h	81 mm / h
t = 60 minutes	18 mm / h	27 mm / h	71 mm / h

### 521 et 522

Courbes donnant les intensités critiques (ou maximales de projet) en fonction de :

la durée des averses pour des périodes de retour de 2 et 10 ans, (courbes de Montana  $i_c = a (t_p)^n$ )

la période de retour pour des averses de 6' et 30'



exercicehydrogota4

Musy

## Exercice n° 5 hydrologie potamologie

## Pluviométrie – tarissement des rivières – hyétogramme- hydrogramme

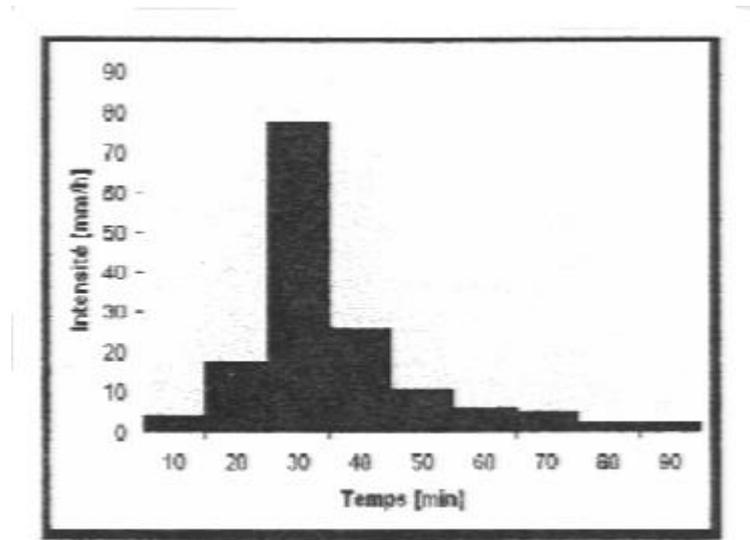
1 Sachant que les précipitations atmosphériques se rangent en

pluies orageuses

OU

pluies fines et durables

auquel de ces deux types, l'événement représenté par un hyétogramme sur la figure infra, peut – t-il être rattaché ?



exercicehydropta5

Musy

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

2 Les courbes **intensité-durée-période** de retour permettent :

de prédire un évènement extrême  
non

oui

de connaître des averses et des débits de projet  
non

oui

Le temps de retour est défini par  $T = 1/p$ , dans lequel p représente :

La probabilité de dépassement  
non

oui

la probabilité de non-dépassement  
non

oui

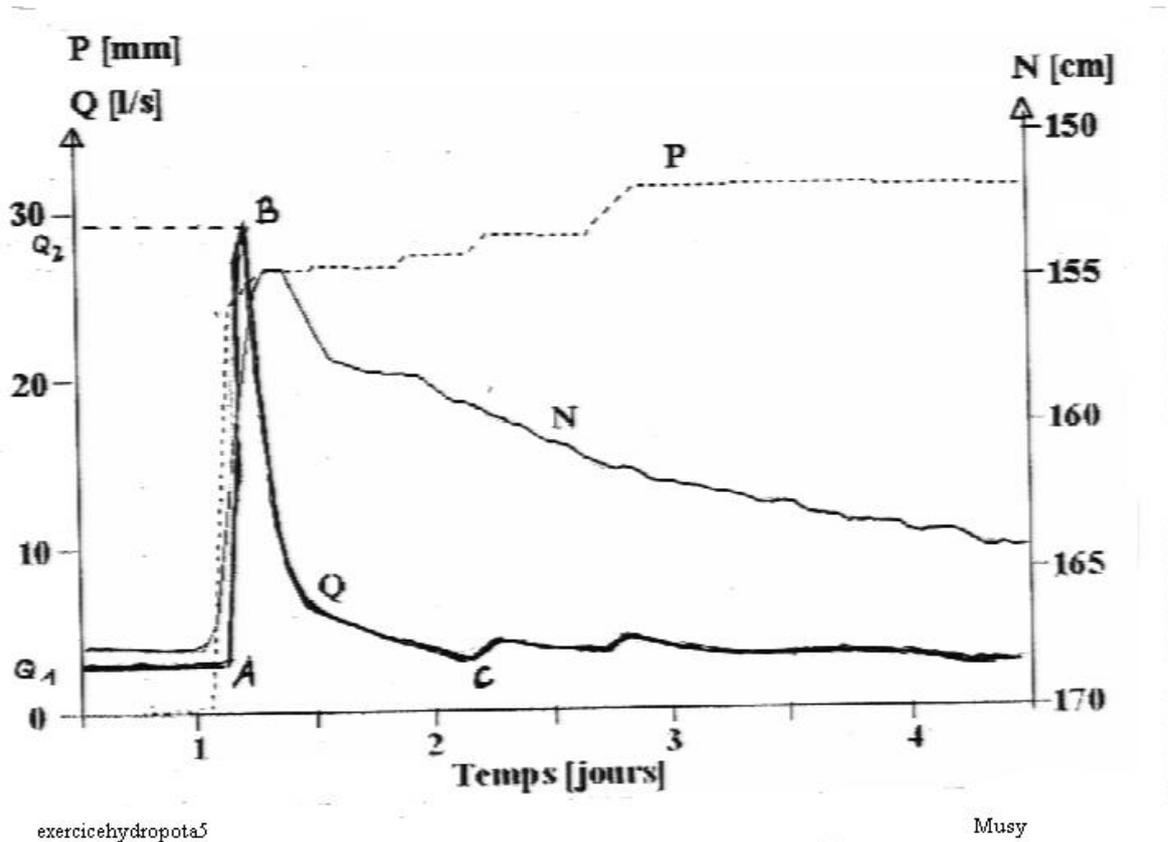
*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

3 La loi de Maillet  $Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$  indique l'évolution du débit d'un cours d'eau à la suite d'une averse,

- d'abord depuis le débit initial le débit augmente par arrivée du ruissellement superficiel
- ensuite le débit baisse tout en recevant l'écoulement dit hypodermique
- enfin le débit revient au débit initial, lequel est lié à celui de la nappe souterraine qui peut l'alimenter.

On a enregistré la profondeur de la nappe N, la pluviométrie cumulée P et les variations du débit Q

cf. graphique infra.



La portion de courbe du débit BC représente – elle ?

l'écoulement hypodermique

oui

non

l'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration

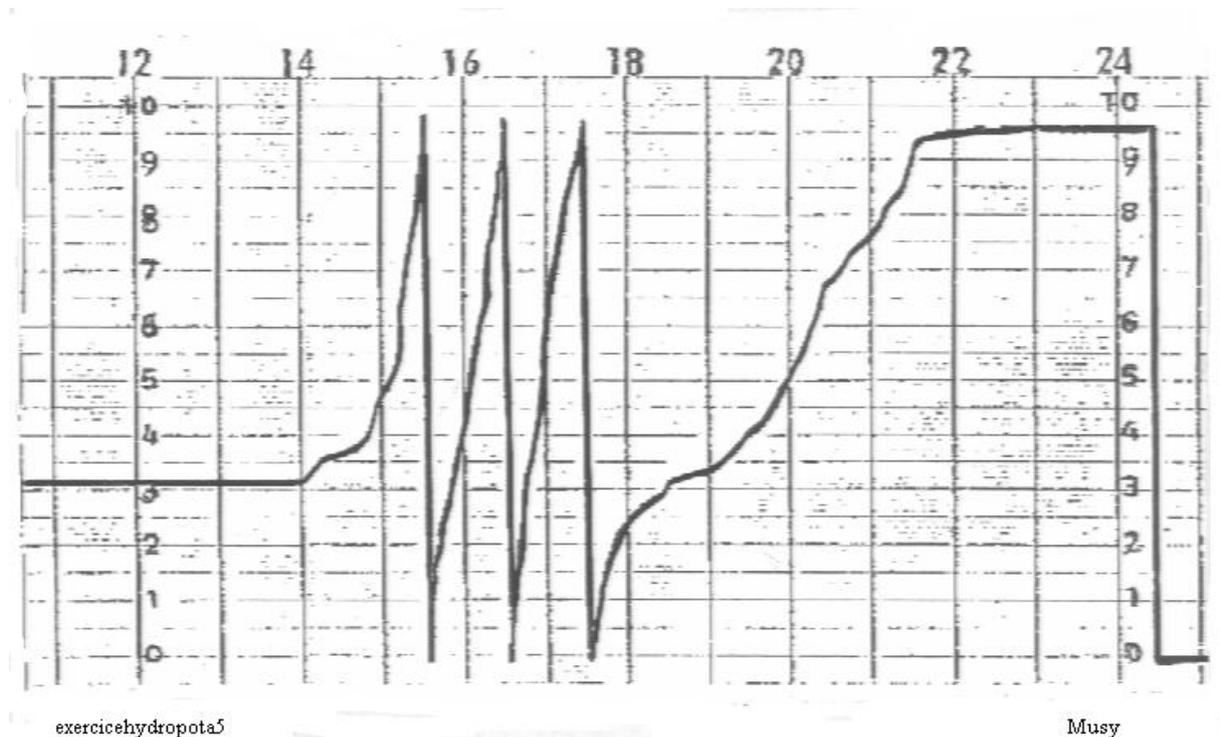
oui

non

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

**40** On dispose des pluviogrammes de la station d'Ecublens Lausanne, l'appareil est à auget basculeur qui se vide lorsqu'il a reçu une quantité d'eau équivalente à 10 mm, ce qui se traduit sur le papier par une trace verticale et une remise à zéro du stylet traceur..

L'enregistrement montre donc la hauteur de la pluie cumulée (en mm) jusqu'à 10 mm avant de revenir à zéro.



Cf. diagramme infra

**41** Calculez les lames précipitées par intervalle de 30' en partant de 14 H, donc de 14 H à 14 30' = ... etc....

**42** Additionnez les résultats obtenus et donnez la lame précipitée totale

**43** Représentez graphiquement les résultats obtenus

en abscisse portez les heures de 14 H à 24 H à l'échelle 1,5 cm = 1 H

en ordonnée la lame précipitée cumulée en mm à l'échelle 2 cm = 10 mm

**44** Tracez le hyétogramme, c'est à dire les intensités (en mm/h) en fonction du temps en adoptant la durée de l'averse égale à une heure qu'il ait plu sans arrêt ou non pendant cette durée  
Rappelons que les intensités sont égales à la hauteur d'eau précipitée en mm divisée par la durée de l'averse, ici = 1 H

Partir de 13 H 30' à 14 H 30' additionnez la hauteur tombée, puis additionnez de 14 H 30' à 15 h 30' etc.....

En abscisse porter les heures de 13 h 30' à 22 h 30'

En ordonnée porter l'intensité et orienter vers le bas

**5** Dans la commune d'Inguiniel il existe une rivière le "Kermaminon" avec un bassin-versant sans talus, dans la commune voisine de Persquen coule la rivière le "Penety " avec un bassin-versant bocager.

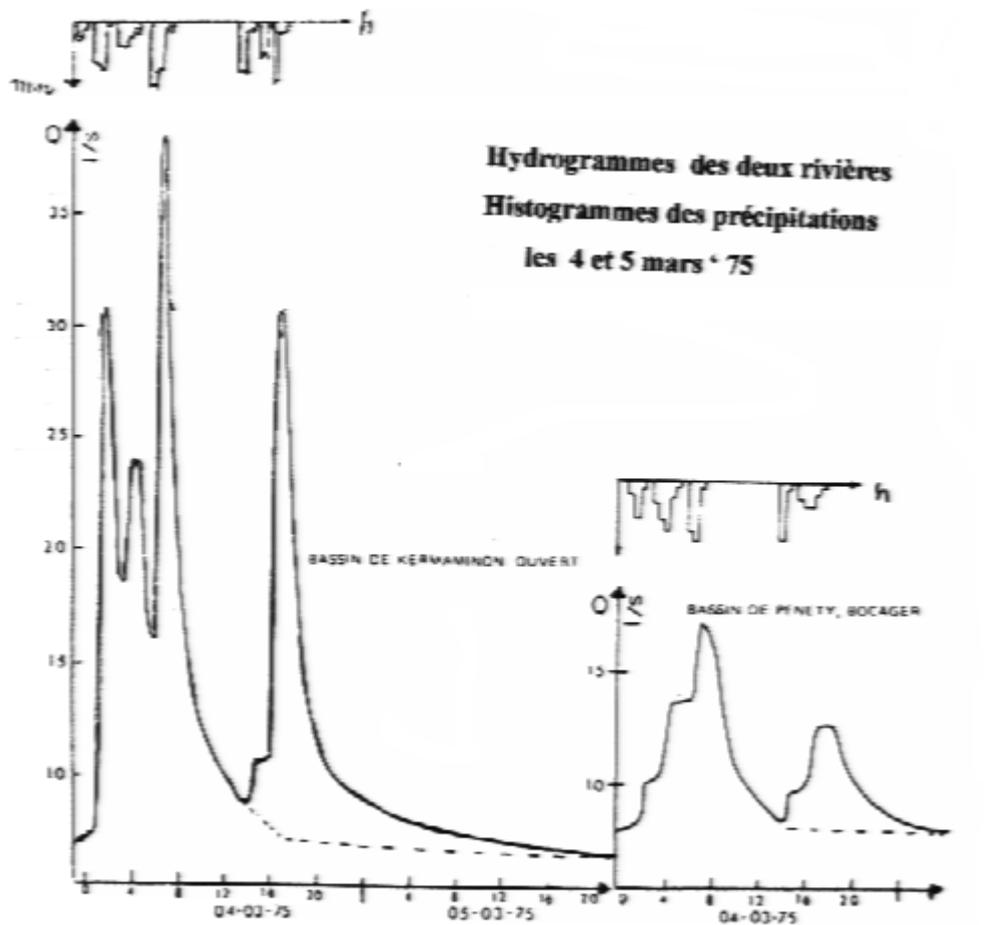
-La climatologie correspond à celle d'un régime océanique.

-Géologiquement ces bassins-versants se situent sur le massif granitique de Pontivy

-Caractéristiques géomorphologiques : cf. tableau infra

caractéristiques	Kermaminon	Penety
Surface totale (ha)	32	32
Surface de marais (ha)	2,5	2,1
Surface bois-lande (ha)	4,5	3,6
Dénivelé (m)	de 166 à 120	de 152 à 120
Périmètre ( km)	2,5	2,3

La crue des 4 et 5 mars 1973 s'est traduite par les diagrammes infra, indiquant le en l/s de chaque rivière et les précipitations tombées.



**51** Estimez par lecture de l'hydrogramme le débit de pointe du Kermaminon entre 0 et 4 H du matin  
Estimez par lecture de l'hydrogramme le débit de pointe du Penety ( représenté par une encoche)  
entre 0 et 4 H du matin également .

**52** Etablir le rapport de ces deux chiffres  $\frac{Q_p \text{ Kermaminon}}{Q_p \text{ Penety}}$

**53** Le résultat du rapport indique un écart qui peut être dû :

SOIT à la pente (dénivelé du Kermaminon plus forte) SOIT à la présence de bocage

Sachant que selon la formule de Black, l'excès de débit dû à la pente indiquerait que le débit du Kermaminon serait égale à 1, 3 fois celui du Penety, peut-on dire que la majeure partie de la différence entre les deux débits de pointe est due au bocage ?

oui

non

**54** Le coefficient de ruissellement  $C_r$  indique le rapport  $\frac{\text{volume d'eau ruisselé}}{\text{Volume total de l'averse}}$

Pour le Kermaminon, ouvert  $C_r$  atteint 5 %

Pour le Penety bocager  $C_r$  n'atteint que .... 2, 3%

Le rapport des 2 chiffres reste voisin de DEUX

Peut-on dire ?

“ que le bassin-versant ouvert présente une puissance de crue 2 fois plus forte que celui bocager ”

oui

non

Peut-on dire aussi ?

“ que corrélativement le volume d'eau disponible pour la réalimentation de la nappe deviendra plus faible ”

oui

non

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

## Corrigé de l'exercice n ° 5 hydrologie potamologie

**1** Sachant que les précipitations atmosphériques se rangent en

- pluies orageuses,

oui

non

- pluies fines et durables ,

oui

non

auquel de ces deux types, l'événement représenté par un hyétogramme sur la figure infra peut -t-il être rattaché ?

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

**2** Les courbes **intensité-durée-période** de retour permettent :

de prédire un événement extrême

oui

non

de construire des averses et des débits de projet

oui

non

Le temps de retour est défini par  $T = 1/p$  , dans lequel  $p$  représente :

La probabilité de dépassement

oui

non

la probabilité de non-dépassement

oui

non

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

**3** La loi de Maillet  $Q_t = Q_o \cdot e^{-\alpha t}$  indique l'évolution du débit d'un cours d'eau à la suite d'une averse,

- d'abord depuis le débit initial le débit augmente par arrivée du ruissellement superficiel

- ensuite le débit baisse tout en recevant l'écoulement dit hypodermique

- enfin le débit revient au débit initial, lequel est lié à celui de la nappe souterraine qui peut l'alimenter.

la portion de courbe du débit BC représente - elle ?

l'écoulement hypodermique

oui

non

l'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration

oui

non

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

### 41

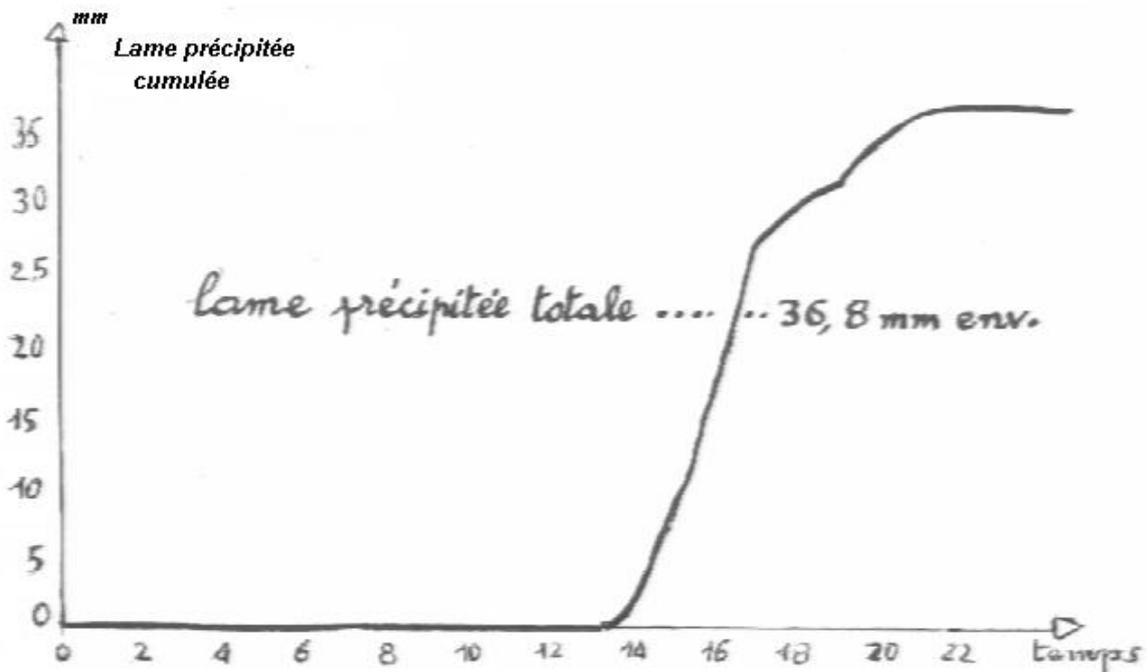
14 H – 14 H 30'	0,6 mm
14 H 30' – 15 H	1,4
15 H – 15 H 30'	5
15 H 30' – 16 H	4
16 H - 16 H 30'	6
16 H 30' – 17 H	5
17 H – 17 H 30'	5
17 H 30' – 18 H	2,5
18 H – 18 H 30'	1,2
18 H 30' – 19 H	0,2
19 H – 19 H 30'	0,5
19 H 30' – 20 H	1
20 H – 20 H 30'	2
20 H 30' – 21 H	0,5
21 H – 21 H 30'	1,5
21 H 30' – 22 H	1

### 42

Somme .....36,4 mm

### 43

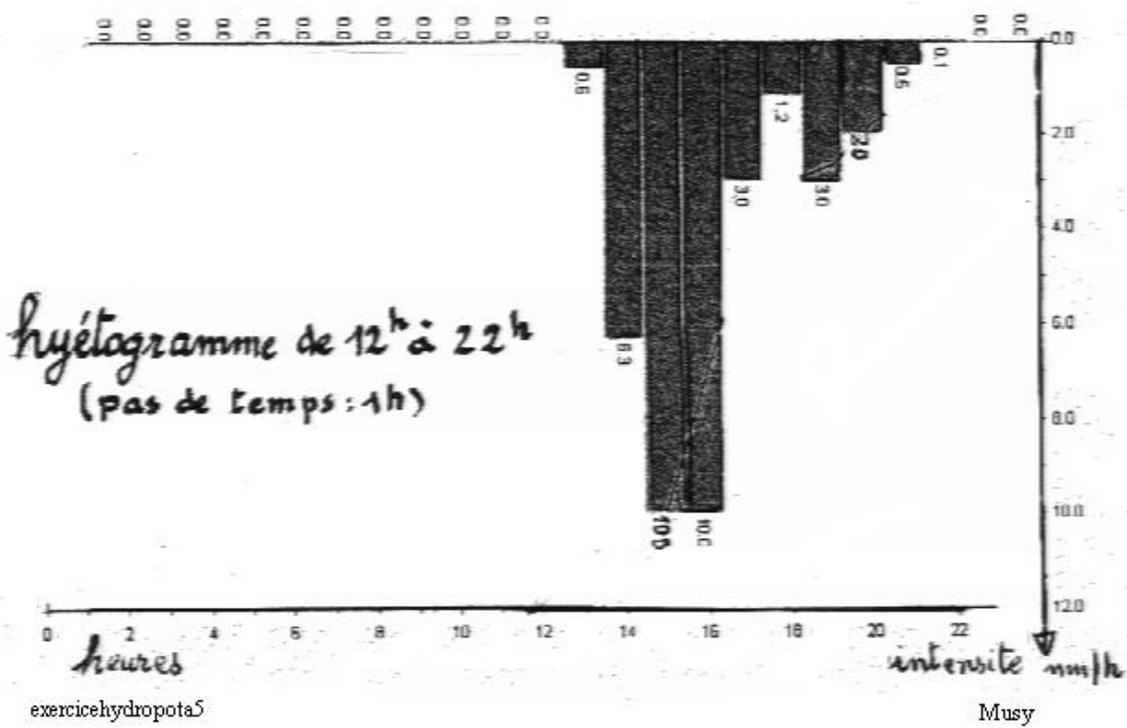
En portant en ordonnée la lame précipitée cumulée en mm et en abscisse le temps il vient la courbe infra



## 44

Il faut d'abord calculer les intensités en fonction des durées d'averses :

13H30' – 14 H 30'	0,6 mm
14 H 30' – 15 H 30'	6,3
15 H 30' – 16 H 30'	10
16 H 30' – 17 H30'	10
17 H 30' – 18 H 30'	3
18 H30' – 19 H 30'	1,2
19 H 30' – 20 H 30'	3
20 H 30' – 21 H 30'	2,3
21 H 30' – 22 H 30'	0,5



L'on obtient ensuite la courbe infra

## 51

débit de pointe du bassin Kermaminon 31 litres /seconde

débit de pointe du bassin Pénety

12,5 litres/seconde

## 52

$Q_{\max}$  de Kermaminon = 2,5  $Q_{\max}$  de Pénety

## 53

Le résultat du rapport indique un écart qui peut être dû :

SOIT à la pente ( dénivelé du Kermaminon plus forte) SOIT à la présence de bocage

Sachant que selon la formule de Black l'excès de débit dû à la pente indiquerait que le débit du Kermaminon serait égale à 1,3 fois celui du Penety, peut-on dire que la majeure partie de la différence entre les deux débits de pointe est due au bocage ?

oui

non

## 54

Le coefficient de ruissellement  $C_r$  indique le rapport  $\frac{\text{volume d'eau ruisselé}}{\text{volume total de l'averse}}$

Pour le Kermaminon, ouvert  $C_r$  atteint 5 %

Pour le Penety bocager  $C_r$  n'atteint que .... 2,3%

Le rapport des 2 chiffres reste voisin de DEUX

Peut-on dire ?

“ que le bassin-versant ouvert présente une puissance de crue 2 fois plus forte que celui bocager ”

oui

non

Peut-on dire aussi ?

“ que corrélativement le volume d'eau disponible pour la réalimentation de la nappe deviendra plus faible ”

oui

non

## Exercice n° 6 hydrologie potamologie

### Sédimentation – barrage - périmètre mouillé – nombre de Froude et régime

#### 1

- La plupart des études de débit solide et des sédimentation furent effectuée pour le colmatage des barrages Oui Non

-La puissance élémentaire du ruissellement se mesure à la force vive acquise par la pesanteur , elle atteint un seuil critique entraînant l'érosion Oui  
Non

-La capture des matières en suspension s'effectue par une turbidisonde, la mesure subséquente est pratiquée par centrifugation, néphélométrie, densimétrie Oui  
Non

#### 2

Dans un cours d'eau large et de faible profondeur le périmètre mouillée  $\chi$  se trouve , en première approximation, égale à la largeur du lit L Oui  
Non

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

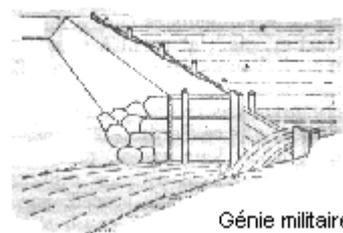
#### 3

Un bassin-versant maghrébin d'une superficie de 500 km<sup>2</sup> reçoit en moyenne 600 mm de pluie annuellement .

Il alimente un barrage qui fut construit en 1960. En 1990 des levées bathymétriques indiquèrent un volume de :

$W_s = 80 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  de vase dans la retenue dudit barrage.

exercicehydropotamo6



**31** Sachant qu'un tiers de l'eau tombée s'évapore, qu'un second tiers s'infiltré et que seul le dernier tiers ruisselle , calculez la lame d'eau annuel s'écoulant jusqu'au barrage.

**32** Les mesures de débit solide à l'entrée du barrage ayant donné en moyenne annuelle une concentration de ... 15 g / litre, en supposant qu'il n'a été pratiqué aucun soutirage des sédiments au niveau du barrage, calculez le tonnage déposé chaque année

**33** En déduire le tonnage apporté en 30 ans toujours sans soutirage de sédiments.

**34** Les études statistiques effectuées au Maghreb pour divers cours d'eau ont donné entre autres les résultats figurant au tableau infra :

nom de l'oued	superficie en km <sup>2</sup>	érosion en tonnes / km <sup>2</sup> / an	turbidité en g / l	débit moyen annuel en Mm <sup>3</sup>
Bou Namouna	575	330	1,3	106
Fodda	800	3 000	26,8	90

le bassin-versant du barrage supra devant être considéré comme fortement érodé par une érosion de type ravinante, l'on retiendra comme chiffre annuel de l'érosion en tonnes / km<sup>2</sup> celui de l'oued Fodda soit ....

3 000 tonnes / km<sup>2</sup>.

Estimez sur cette base le tonnage de sédiments apportés annuellement dans la retenue du barrage et vérifiez la concordance avec le chiffre calculé au § 32

#### 4

Soit un oued dont l'écoulement est uniforme et dont la vitesse  $u = 1 \text{ m/s}$ . La hauteur d'eau est de 0,4 mètre la largeur de l'oued est très grande devant la profondeur. Le coefficient C de la formule de de Chézy ( $u = C\sqrt{Ri}$ ) est égal à 40.

#### 41

Déterminez le rayon hydraulique R

#### 42

Calculez la pente de l'oued

#### 43

Calculez la largeur L sachant que le débit  $Q = 3 \text{ m}^3 / \text{sec}$ .

#### 44

Calculez le nombre de Froude de l'écoulement, en déduire si le régime d'écoulement est fluvial ou torrentiel

## Corrigé de l'exercice n ° 6 hydrologie potamologie

**1**

- La plupart des études de débit solide et de sédimentation furent effectuée pour le colmatage des barrages

ou  non

-La puissance élémentaire du ruissellement se mesure à la force vive acquise par la pesanteur , elle

ou  non

atteint un seuil critique entraînant l'érosion

-La capture des matières en suspension s'effectue par une turbidisonde, la mesure subséquente est

ou  non

pratiquée par centrifugation, néphélogéométrie, densimétrie

**2**

ou  non

Dans un cours d'eau large et de faible profondeur le périmètre mouillée  $\chi$  se trouve , en première approximation, égal à la largeur du lit L

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

**3**

**31**

si 0,6 m d'eau tombe chaque année sur  $500 \text{ km}^2$  , il vient :

$$0,6 \cdot 500 \cdot 10^6 = 300 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

la lame d'eau représentant le tiers soit  $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{an}$

**32**

le débit solide atteignant 15 g / litre donc  $15 \text{ kg} / \text{m}^3$  , il vient :

$$15 \cdot 100 \cdot 10^6 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ tonnes de sédiments} / \text{an}$$

**33**

après 30 ans sans soutirage la quantité de sédiments atteindrait :

$$30 \cdot 1,5 \cdot 10^6 = 45 \cdot 10^6 \text{ tonnes de sédiments}$$

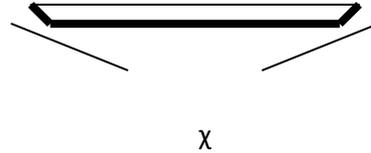
**34**

si 3 000 tonnes sont enlevées par  $\text{km}^2$  et par an sur  $500 \text{ km}^2$  , il vient :

$$3\,000 \cdot 500 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ tonnes de sédiments} / \text{an}$$

l'on retombe sur le même chiffre que celui calculé au § 32, donc l'hypsométrie et la géologie du bassin-versant du barrage et celles de celui de l'oued Fodda apparaissent comme semblables

## 4



### 41L

L'on sait que  $R = \frac{\omega}{\chi}$  mais  $\chi = L$  en 1<sup>ère</sup> approximation

$$R = \frac{L \cdot h}{L + 2h} \quad \text{avec } L = L + 2h$$

donc  $R = h$  et  $R = 0,40 \text{ m}$

### 42

selon la formule de de Chézy  $u = C \sqrt{R i}$   
 $i = \frac{u^2}{C^2 R}$

$$i = 0,0015$$

### 43

si  $Q = 3 \text{ m}^3 / \text{sec.}$   $\omega = 3 \text{ m}^2$  pour une vitesse de  $1 \text{ m} / \text{sec.}$

mais  $R = \frac{\omega}{\chi}$  et  $L = \chi$

$$\text{donc } L = \frac{3}{0,4}$$

$$L = 7,50 \text{ m}$$

### 44

l'on sait que

$$F^2 = \frac{u^2}{gR}$$

Il vient

$$F^2 = \frac{1}{0,4 \cdot 9,8}$$

—  $F = 0,5$  l'énergie cinétique  $u^2$  se trouvant plus petite que les forces de pesanteur  $\sqrt{g R}$ , l'écoulement suit un régime fluvial.

## Exercice n°7 d'hydrologie potamologie

### Probabilité d'apparition pluie– pluviométrie par la méthode des isohyètes

#### 1

Les projets hydrauliques tels que fossés, aqueducs, barrages, ponts, aménagements de rivière ... sont définis par rapport à une pluie- type (averse, précipitation) d'intensité dite critique ou moyenne maximale ;

oui

non

#### 2

Les courbes intensité- durée-période de retour servent à :

construire les pluies de projet

oui

non

et ensuite à estimer les débits de projet

oui

non

#### 3

La probabilité d'apparition d'une pluie d'intensité critique ( ou de projet )  $i_c$  correspond au :

nombre de cas où elle s'est produit

nombre des cas où elle aurait pu se produire

et la période de retour correspond à l'inverse : 1  
probabilité

Peut-on dire qu'une pluie avec une intensité critique de probabilité ( fréquence ) 1/100 ème soit 1 chance sur 100 donc de période de retour 100 ans (centennale) se produit :

en moyenne 4 fois en quatre cents ans

oui

non

au maximum 1 fois en cent ans

oui

non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste pour les questions 1,2, 3*

#### 4

Sur un bassin-versant donné de superficie =  $1 \text{ km}^2$  il a plu 3, 6 mm durant une heure, donc  $t_p = 1$  heure. Sachant que le coefficient d'écoulement (ruissellement)  $K = 0, 25$ , ce qui correspond en ville à des lotissements et en campagne à des sols sablo-argileux sans végétation, calculez :

- le volume tombé, en  $\text{m}^3$

- le débit de ruissellement ( écoulement) généré par cette surface, l'exprimer en  $\text{m}^3 / \text{seconde}$

#### 5

On considère le bassin-versant de la Broye, en Suisse dont la superficie s'élève à ....  $392 \text{ km}^2$  pour une altitude moyenne de ... 710 mètres . On désire estimer la lame précipitée moyenne annuelle pour ce bassin, en utilisant les données regroupées dans le tableau infra contenant les pluviométries mesurées en 10 points dudit bassin.

**Stations pluviométriques avec leur lame précipitée annuelle moyenne**

Numéro ISM	Nom station	Altitude ( m )	Lame précipitée moyenne ( mm/an )
5720	<i>Romont</i>	688	1128
5830	Semsaies	873	1511
5870	Moudon-Ville	525	1102
5900	Payerne-Ville	450	900
6137	Villars-Tiercellin	850	1343
6150	Thierrens	770	1061
6160	Chanéaz	758	1005
6170	Châbles (FR)	589	1014
8025	Fruence	830	1656
8060	Tour de Gourze	915	1266

**51** Quelle sera la lame d'eau précipitée moyenne annuelle pour ce bassin versant en utilisant la moyenne arithmétique ?

**52** Sur le plan *infra* ont été tracées (à l'instar des courbes de niveau) les isohyètes espacées de 100 mm. Sachant que pour la partie la plus au nord la pluie moyenne atteint..... 950 mm contre .... 1 450 mm pour la partie la plus au nord.

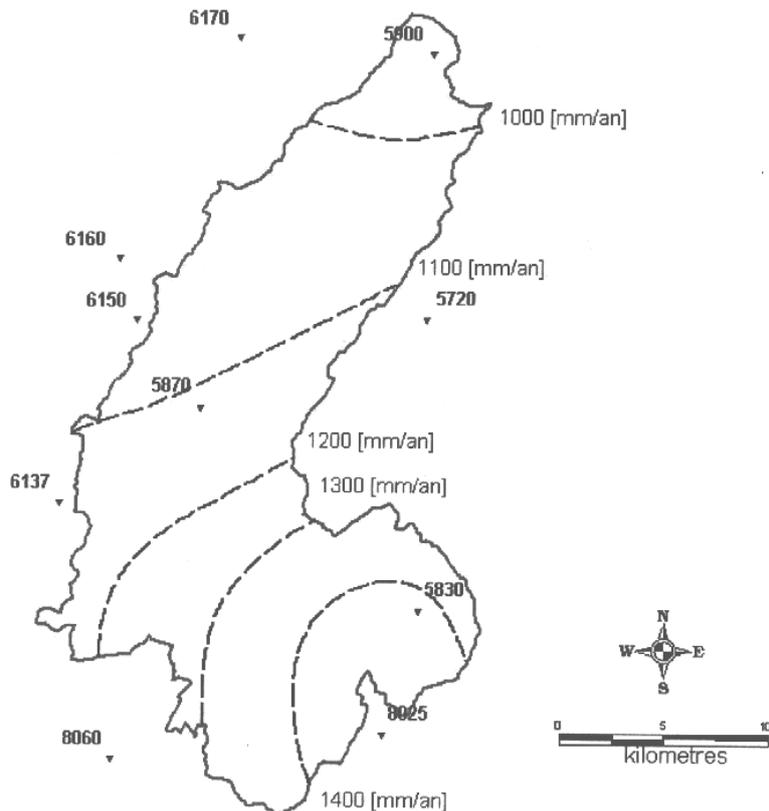
- Calculez la pluie moyenne entre deux isohyètes, portez les résultats dans le tableau *infra*
- Multipliez la pluie moyenne entre deux isohyètes par la surface comprise entre ces deux courbes
- Calculez la pluie moyenne (lame précipitée) du bassin selon la formule :  $p_{moyenne} = \frac{\sum A_i \cdot p_i}{A}$

A : surface totale du bassin

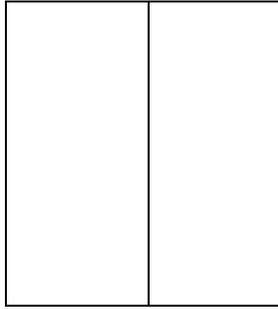
$A_i$  ; surface entre deux isohyètes

$p_i$  : pluie moyenne entre deux isohyètes

Moyenne inter-isohyètes mm/an	Surface inter-isohyètes Km <sup>2</sup>
950	24,9
	116,4
	83,2
	48,8
	76,7
1 450	42



Calcul de la pluviométrie moyenne du bassin de la Broye par la méthode des isohyètes



## Corrigé de l'exercice n° 7 d'hydrologie potamologie

**1** Les projets hydrauliques tels que fossés, aqueducs, barrages, ponts, aménagements de rivière ... sont définis par rapport à une pluie type (averse ou précipitation) d'intensité dite critique ou de projet

Oui  Non

**2** Les courbes intensité - durée - période de retour servent à :

d'abord à définir les pluies de projet

Oui  Non

ensuite à estimer le débit de projet

Oui  Non

**3** Peut-on dire qu'une pluie avec une intensité critique de probabilité (fréquence) 1 / 100 ème ou une chance sur 100 donc de période de retour 100 ans (centennale) se produit :

En moyenne 4 fois en quatre cents ans

Oui

Non

Au maximum une fois en cent ans

Oui

Non

**4** Pendant une heure le volume tombé est égal à, la lame d'eau par la surface soit :

$$3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 3\,600 \text{ m}^3$$

Si le coefficient de ruissellement (écoulement = 0,25, il vient :

$$\frac{3\,600 \text{ m}^3 \cdot 0,25}{3600 \text{ secondes}} = 0,25 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

**5**

**51**

La moyenne arithmétique donne 1 200 mm / an

**52**

Moyenne inter-isohyètes mm/an	Surface inter-isohyète s Km <sup>2</sup>	Résultat par tronçon
-------------------------------	--	----------------------

950	24,9	23 655
1 050	116,4	122 220
1 150	83,2	95 680
1 250	48,8	61 000
1 350	76,7	103 545
1 450	42	60 900

Résultat total ... 467 000 , d'où pluviométrie moyenne  $\frac{467\,000}{392} = 1\,191$  mm / an avec  $A = 392$  km<sup>2</sup>

La méthode des isohyètes tient mieux compte de la répartition spatiale des averses que la moyenne arithmétique

## Exercice n° 8 d'hydrologie potamologie

### Pluviométrie - période de retour quinquennale - formule de débit de Caquot

1

La période de retour d'un débit est la même que celle de la pluie l'ayant provoqué  oui  non

Pour un même bassin-versant plus le coefficient de ruissellement est élevé et plus le débit de pointe sera élevé  oui  non

Un débit de pointe calculé selon une période de retour quinquennale sera inférieur à un débit de pointe calculé selon une période de retour décennale  oui  non

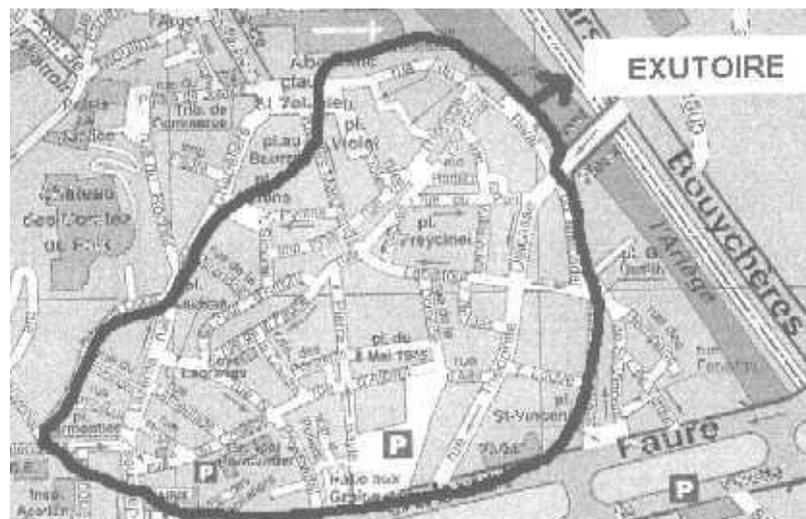
Lorsque dans une ville l'on ne possède point les coefficients de Montana de la pluie de projet ( $i_c = a \cdot t^b$ ) calculés sur ladite ville, l'on emploie les coefficients tels que définis dans la circulaire du 22 juin 1977  oui  non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

2

Le bassin versant du centre de la ville de Foix est caractérisé par une urbanisation dense ce qui conduit à un coefficient de ruissellement

C de ... 0,80



Enseeiht

Bassin-versant de Foix en ' 99

selon les instructions techniques du 22 juin 1977.

Ainsi que le montre la carte ci-contre , l'exutoire de ce bassin-versant est l'Ariège

A défaut de mesures locales , les caractéristiques pluviométriques retenues pour la région correspondront à celles de la zone II

Cf. carte *infra*



Cette carte renvoie à l'équation de l'intensité critique ou de projet dite de Montana

$$i_c = a (P) t^{b(P)} \quad P \text{ représentant la probabilité de dépassement}$$

Selon l'habitude l'on raisonne en période de retour ( l'inverse de la probabilité ou fréquence) et là l'on retiendra une période de retour quinquennale , l'équation de Montana deviendra alors selon la circulaire

$$i_5 = 55 t^{-0,57}$$

La méthode d'évaluation des débits quant à elle repose sur la méthode superficielle de Caquot.



Enseeiht

bassins versants élémentaires

Dans ce dessin, le bassin-versant a été décomposé en bassins élémentaires lesquels suivent dans la plupart des cas les rues et les lignes de toit ( caniveaux, écoulement en gouttière.....)

cf. carte ci-contre

Nom du bassin	Aire A en ha.	Coeff. ruissellement	pente	Plus long parours L en hm
A	1,26	0,80	0,01	0,53

## 21

A l'aide de l'abaque de format A<sub>3</sub>, ci-joint, déterminez le débit brut d'eau pluviale à la sortie du bassin élémentaire A

## 22

Au moyen de l'abaque de format A<sub>4</sub>, ci-joint, évaluer le coefficient de forme du bassin  $\psi$  après avoir calculé le paramètre M ;  $M = \frac{L}{\sqrt{A}}$

$$\sqrt{A}$$

Dans ce cas le débit brut doit-il être corrigé par le coefficient de forme  $\psi$  ?

## Corrigé de l'exercice n° 8 hydrologie potamologie

1

La période de retour d'un débit est la même que celle de la pluie l'ayant provoqué  oui non

Pour un même bassin-versant plus le coefficient de ruissellement est élevé et plus le débit de pointe sera élevé  oui non

Un débit de pointe calculé selon une période de retour quinquennale sera inférieur à un débit de pointe calculé selon une période de retour décennale  oui non

Lorsque dans une ville l'on ne possède point les coefficients de Montana de la pluie de projet ( $i_c = a t^b$ ) calculés sur ladite ville, l'on emploie les coefficients tels que définis dans la circulaire du 22 juin 1977

oui non

*Cerchez la réponse que vous estimez juste*

2

21

Le débit brut de période de retour quinquennale sur la bassin élémentaire A s'élève à ... 0,360 m<sup>3</sup> / seconde

## 22

le paramètre  $M = \frac{0,53}{\sqrt{1,26 \cdot 1,12}} = \frac{0,53}{1,12} = 0,47$  selon la formule  $M = \frac{L}{\sqrt{A}}$

Selon l'abaque de format A<sub>4</sub> le coefficient  $v$  n'a pas à être appliqué car  $M < 0,8$ .

D'ailleurs au vu de la carte, l'on remarque que la forme en quadrilatère de ce bassin versant dispense de l'usage du coefficient de forme  $v$ .

# Exercice n° 9 d'hydrologie potamologie

## bassin-versant – intensité pluviométrique – coefficient d'écoulement

### 1

L'action d'un bassin-versant peut se définir comme la transformation d'une pluie spatialement distribuée en un débit à l'exutoire oui non

L'intensité de la pluie  $i = \frac{\Delta h}{\Delta t}$  est représentée graphiquement par un hyétoqramme oui non

Le débit de la rivière à l'exutoire est représenté graphiquement par un hydrogramme oui non

Un bassin-versant peut se définir comme la surface terrestre sur laquelle les eaux de pluie tombées alimentent le talweg drainant ladite surface oui non

Le bassin-versant hydro-géologique peut se révéler distinct du bassin- versant géographique oui non

## Cerclez la réponse que vous estimez juste

**2**

Le bassin -versant considéré est représenté par la carte au 1/ 25 000 ème

ci-contre

Il s'étend à une altitude de 400 mètres environ dans le Massif Central et couvre une superficie de..... 17 km<sup>2</sup>, son sol est occupé par des prairies permanentes.

La hauteur des précipitations annuelles s'élève à ..... 810 mm



Le volume d'eau annuel arrivant à l'exutoire se monte à .....  $4,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

**21**

Dans un point dudit bassin il a été mesuré la précipitation tombée à l'aide d'un pluviographe de pas = 6 minutes le résultat des mesures effectuées un 22 septembre figurent sur le tableau ci-contre

heures	Hauteur des précipitations en mm
9 h 06 '	2,6
9 h 12 '	10
9 h 18 '	2
9 h 24 '	0,6
9 h 30 '	0,4

Calculez la hauteur d'eau tombée entre 8 h 54 ' et 9 h 30'  
Calculez l'intensité en mm/ minute

S'agit-il d'une pluie orageuse ou de type océanique ?

## 22

Calculez la lame d'eau écoulee sur le bassin, sachant que

$$I = \frac{\text{volume écoulé à l'exutoire}}{\text{surface du bassin-versant}}$$

Calculez le coefficient d'écoulement (ruissellement) sachant que  $K = \frac{\text{lame d'eau écoulee sur un an}}{\text{hauteur des précipitations annuelles}}$

Vérifiez le résultat en calculant selon la formule  $K = \frac{\text{volume écoulé}}{\text{volume précipité}} = \frac{\text{volume écoulé}}{\text{surface du bassin} \cdot \text{hauteur précipitée}}$

## Corrigé de l'exercice n° 9 hydrologie potamologie

### 1

L'action d'un bassin-versant peut se définir comme la transformation d'une pluie spatialement distribuée en un débit à l'exutoire  oui non

L'intensité de la pluie  $i = \frac{\Delta h}{\Delta t}$  est représentée graphiquement par un hyétogramme  oui non

Le débit de la rivière à l'exutoire est représenté graphiquement par un hydrogramme  oui non

Un bassin-versant peut se définir géographiquement comme la surface terrestre sur laquelle les eaux de pluie tombées alimentent le talweg drainant ladite surface  oui non

Le bassin-versant hydro-géologique peut se révéler distinct du bassin-versant géographique  oui non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

## 2 21

La hauteur d'eau tombée s'élève à .....15, 6 mm

L'intensité se monte à  $\frac{15,6}{36} = \dots\dots 0, 43$  mm / minute, elle se classe dans les intensités de pluies orageuses

## 22

Lame d'eau écoulée  $\frac{4,3 \cdot 10^6}{17 \cdot 10^6} = \dots\dots 250$  mm ou 0, 25 m

Coefficient d'écoulement (ruissellement)  $\frac{250}{810} = \dots\dots\dots 0, 30$

# Exercices d'hydrogéologie écosystèmes avec corrigés

---

n°1 : nappe alluvionnaire-isochrone teneur eau- évapotranspiration

n°2 : loi de Darcy - lame d'eau - déficit écoulement - piézométrie

n°3 : vidange nappe - profil hydrique - écoulement hypodermique

n°4 : nappe captive - strates aquifères - débit d'un puits

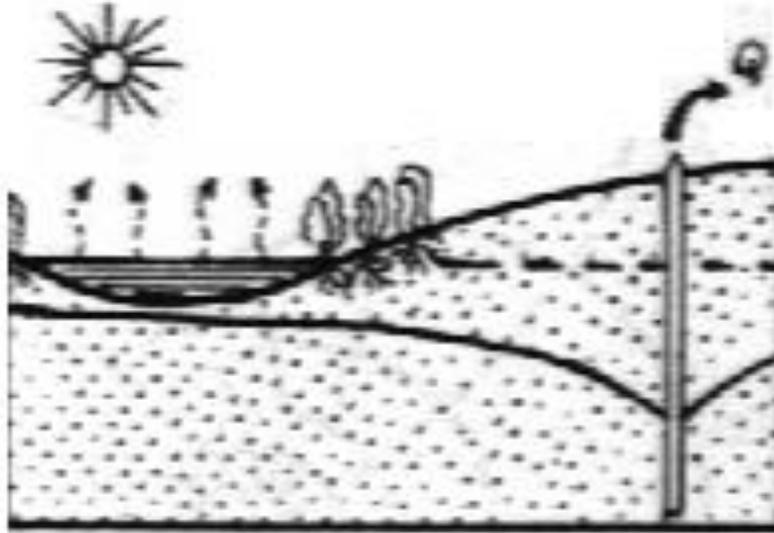
n°5 : conservation de la masse-bilan hydrologique-arène granitique

n°6 : isopièzes - galerie captage - potentiels capillaire, gravitaire

n°7 : isopièzes - nappe alluvionnaire - pollution chimique

n°8 : ères géologiques-colonne stratigraphique-débit des nappes

n°9 : nappe profonde-artésianisme-horizon aquifère fracturé



## Exercice n° 1 hydrogéologie écosystèmes

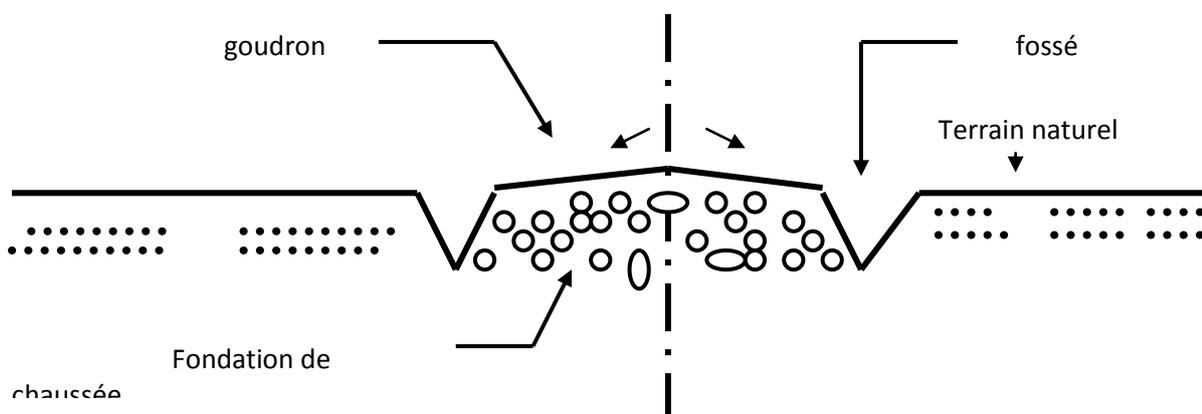
### Nappe alluvionnaire - isochrone de teneur en eau du sol - évapotranspiration

1

Tracez le profil en travers représentant une rivière et sa nappe alluvionnaire en période estivale où la rivière ne présente plus qu'un faible tirant d'eau, la nappe quant à elle restant très puissante.

2

Sachant que les fossés d'une chaussée permettent d'évacuer l'eau tombée dessus ladite chaussée même en cas d'orage violent, expliquez à partir du croquis infra, par quel phénomène les chaussées d'un secteur géographique, où la nappe alluvionnaire s'avère très puissante, peuvent être noyées par orage violent.



### 3

*Dans la zone non saturée l'on trouve les trois éléments : eau, air, terre, dans*

*la zone saturée l'on en trouve seulement deux : terre, eau*

Les processus intervenant dans le milieu non saturé caractérisent les échanges hydriques du continuum climat – sol – plante	oui	non
Le niveau de l'eau souterraine dans un sol est déterminé par le régime de percolation de la pluie à travers la zone non saturée	oui	non

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

### 4

Dans une région à climat continental, les sols arables présentent une texture sablo-argileuse avec une structure contenant 30 % en cailloux et graviers laissant donc facilement passer l'eau.

Sur ces sols est cultivé un maïs planté en mai et récolté en octobre et bien entendu irrigué puisque son cycle végétatif correspond à la plus faible pluviométrie.

En effet du mois de mai au mois d'octobre, les précipitations pluvieuses s'élèvent seulement à..... 280 mm

#### 41.

A partir du tableau infra, **tracez les courbes** représentant en octobre et en mai, la teneur en eau du sol  $\tau$  (exprimée en  $m^3$  eau par  $m^3$  de terre) en fonction de la profondeur exprimée en mètres donc orientée vers le bas.

Profondeur du sol	$\tau$ en octobre	$\tau$ en mai
0,25	0,05	0,21
0,50	0,07	0,24
0,75	0,16	0,26
1,00	0,23	0,28
1,25	0,30	0,30

L'on obtient deux courbes isochrones de la teneur en eau se rejoignant au point ( $z = 1,25$  m et  $\tau = 0,30$ ) représentant le profil hydrique du sol aux profondeurs considérées en mai et en oct.

#### 42

L'aire, comprise entre les deux courbes, de forme algébrique :  $\int_0^Z (\tau_{\text{mai}} - \tau_{\text{octobre}}) dz$   
représente le volume d'eau perdue entre mai et oct. par  $m^2$

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion* oui non

43

Calculez la réserve d'eau en mai et celle en octobre par tranche de  $0,25m^3$  de terre, en  $m^3$  d'eau /  $m^2$  de sol et totalisez pour chacun de ces deux mois.

44

En plus des pluies citées à la page précédente il a été apporté par irrigation ..... 220 mm d'eau.

Il a été aussi mesuré en case lysimétrique la percolation qui s'est élevée à ... 65 mm d'eau

Transformez d'abord les réserves, calculées supra, en mm d'eau représentant une lame fictive sur le sol en sachant que :

$$1 \text{ mm d'eau sur 1 hectare} = 10 \text{ m}^3 \quad \text{et que } 1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$$

45

L'équation de la continuité s'écrivant :

Pluies naturelles et artificielles (irrigation) + réserve du sol en mai = percolation + évapotranspiration + réserve en octobre

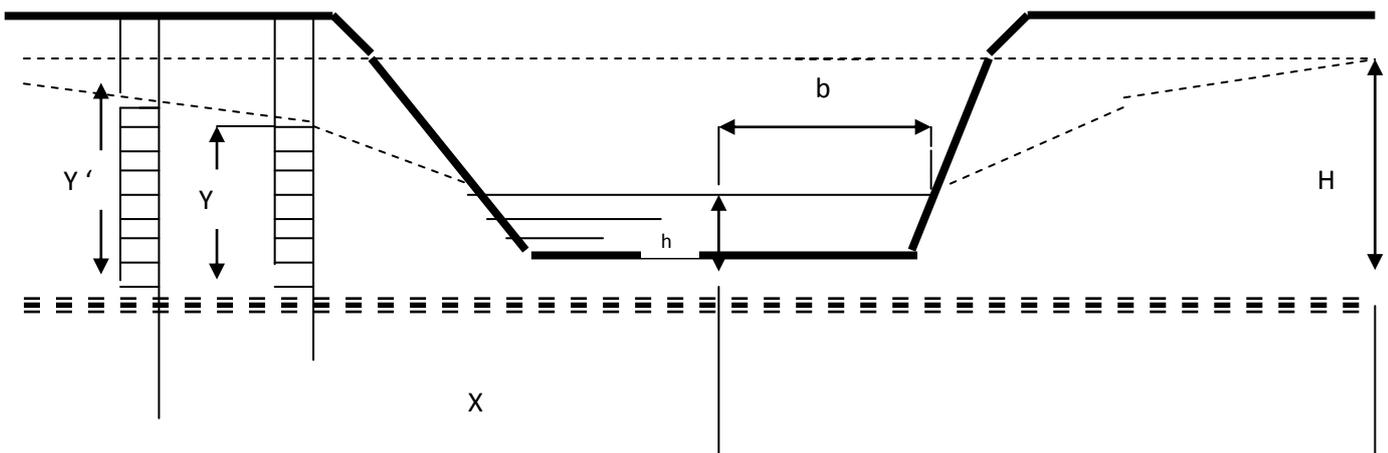
Calculez l'évapo-transpiration

## Corrigé de l'exercice n°1 hydrogéologie écosystèmes

1

La relation nappe rivière est illustrée par le croquis *infra*

### Relation nappe - rivière





Exercicehydrogéol

Bouloc

**2**

Dans le cas de fortes pluies, l'eau tombée sur la chaussée est évacuée par les fossés .....jusqu'à ce que la nappe phréatique remonte, envahisse les fossés lesquels n'abondent plus, le niveau montera et submergera la chaussée.

**3**

Dans la zone non saturée l'on trouve les trois éléments : eau, air, terre,

dans la zone saturée l'on en trouve seulement deux : terre , eau

Oui non

Les processus intervenant dans le milieu non saturé caractérisent les échanges hydriques du continuum climat – sol – plante

oui non

Le niveau de l'eau souterraine dans un sol est déterminé par le régime de percolation de la pluie à travers la zone non saturénon

oui

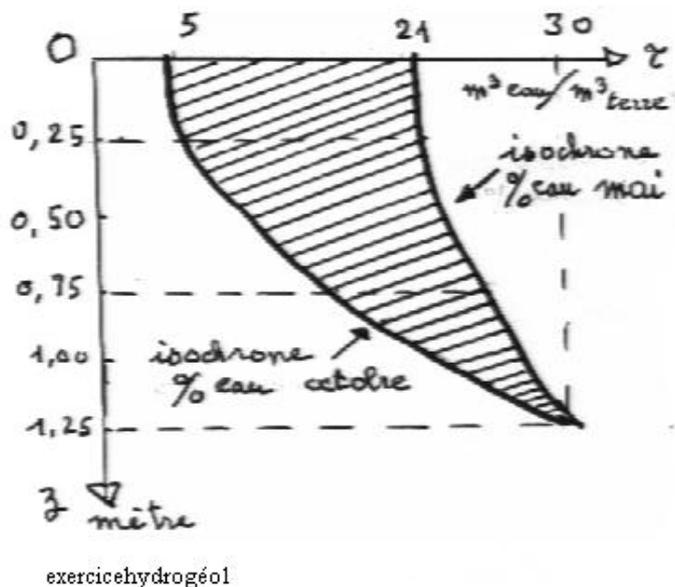
*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

**4**

**41**

Les deux courbes représentent les isochrones de la teneur en eau , exprimée en  $m^3 \text{ eau} / m^3 \text{ de terre}$ , en mai et en octobre

cf. graphique ci-contre



**42**

L'aire, comprise entre les deux courbes, de forme algébrique :

$$\int_0^z (\tau_{\text{mai}} - \tau_{\text{octobre}}) dz$$

représente le volume d'eau perdue entre mai et oct. par  $m^2$

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

oui non

**43**

La réserve en mai , calculée par tranche de  $0,25 \text{ m}^3$  de terre devient alors :

$$\frac{0,21}{4} + \frac{0,24}{4} + \frac{0,26}{4} + \frac{0,28}{4} + \frac{0,30}{4} = 0,32 \text{ m}^3 \text{ d'eau / m}^2 \text{ de sol}$$

La réserve d'eau en octobre calculée par tranche de  $0,25 \text{ m}^3$  de terre s'écrit donc :

$$\frac{0,05}{4} + \frac{0,07}{4} + \frac{0,16}{4} + \frac{0,23}{4} + \frac{0,30}{4} = 0,20 \text{ m}^3 \text{ d'eau / m}^2 \text{ de sol}$$

#### 44

Transformons ces teneurs en eau en lame d'eau fictive sachant que  $1 \text{ mm}$  d'eau sur  $1 \text{ ha} = 10 \text{ m}^3$  d'eau

$0,32 \text{ m}^3 \text{ d'eau / m}^2 \text{ de sol} \rightsquigarrow 3\,200 \text{ m}^3 \text{ d'eau / } 10\,000 \text{ m}^2 \text{ de sol}$  soit une lame fictive de ...  
 $320 \text{ mm}$

$0,20 \text{ m}^3 \text{ d'eau / m}^2 \text{ de sol} \rightsquigarrow 2\,000 \text{ m}^3 \text{ d'eau / } 10\,000 \text{ m}^2 \text{ de sol}$  soit une lame fictive de ...  
 $200 \text{ mm}$

#### 45

L'équation de la continuité

Pluies naturelles et irrigation artificielle + réserves en mai = évapotranspiration + percolation + réserves en octobre  
devient alors :

$280 \text{ mm (pluie)} + 220 \text{ mm (irrigation)} + 320 \text{ mm} = \text{évapotranspiration} + 65 \text{ mm (percolation)} + 200 \text{ mm}$

$$\text{évapotranspiration} = 555 \text{ mm}$$

ce qui correspond bien à la fourchette de consommation d'un maïs  $400$  à  $700 \text{ mm}$  d'eau.

## Exercice n° 2 hydrogéologieécosystèmes

### Loi de Darcy – lame d'eau - déficit d'écoulement - piézométrie

#### 1

L'écoulement souterrain soutient

le débit d'étiage quand

la nappe communique avec la rivière

oui

non

Dans un milieu terreux, avec un liquide en charge le champ des vitesses de filtration

dérive d'un potentiel hydraulique dit aussi charge

oui

non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

#### 2

Le bassin de la Broye présente une très forte imperméabilité et couvre une superficie de ...  $392 \text{ km}^2$ .

L'on dispose à son sujet des données suivantes :

- évapotranspiration annuelle en mm calculée selon la formule de Turc,
- la pluviométrie annuelle en mm, recueillie à la station de Romont,
- le débit moyen annuel en  $\text{m}^3/\text{sec}$

cf. tableau infra établi après 14 ans de mesures

année	ET mm	lame précipitée mm	débit moyen m <sup>3</sup> /sec
1978	468	1213	9,7
1979	518	1201	10,0
1980	488	1250	10,8
1981	521	1272	10,4
1982	554	1386	10,4
1983	552	1244	9,5
1984	518	1241	9,0
1985	569	1145	5,2
1986	540	1176	8,2
1987	521	1468	10,0
1988	574	1417	10,5
1989	614	892	4,6
1990	635	1373	8,1
1991	603	1118	7,3

- 21** Calculez la lame d'eau écoulée année par année
- 22** Calculez le débit moyen sur la période de 14 ans considérée, en inférer la lame d'eau moyenne écoulée sur la même période
- 23** Etablissez le déficit d'écoulement année par année
- 24** Reportez les chiffres obtenus du déficit d'écoulement sur un graphique

#### Pistes

la lame d'eau écoulée en rivière s'obtient par la formule

$$l \text{ mm / an} = \frac{Q \text{ m}^3/\text{sec} \cdot 365 \cdot 86400 \cdot 10^{-3}}{S \text{ km}^2}$$

Sur un bassin imperméable le déficit s'écrit : flux entrant - flux sortant

Si l'on considère la variation du stock d'eau négligeable car pas d'infiltration, il vient :

$$\text{déficit mm} = \text{pluviométrie mm} - (\text{évapotranspiration mm} + \text{écoulement mm})$$

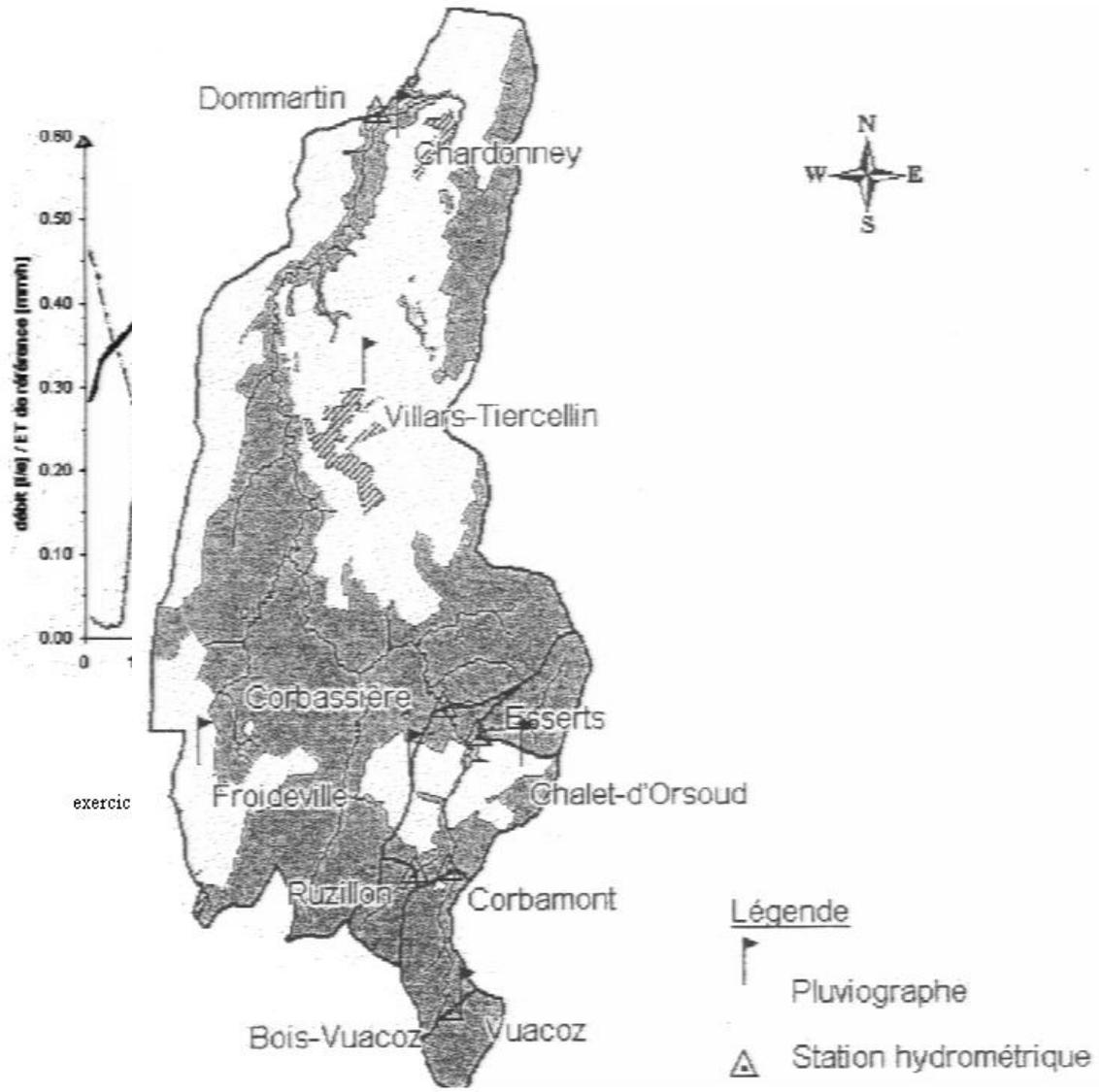
Pour le graphique l'on placera les années en abscisse et le déficit en ordonnée qui oscillera autour de zéro.

### 3

Le bassin-versant de la Haute-Mentue faisant l'objet de recherches en hydrologie, il a été nécessaire de mettre en place un réseau d'instrument : pluviographes, limnigraphes, échantillonneurs d'eau et piézomètres.

L'un de ces derniers a permis la mesure de la variation de la nappe du sous-bassin de Bois-Vuacoiz entre le 27 août et le 2 sept. '98 soit sur une durée de 170 heures environ. Cf. plan *infra*

Les résultats des mesures piézométriques sont portés sur le graphique infra (trait-point) avec les



exercicehydrogé02

Musy

mesures de débit ( trait foncé) et d'évapotranspiration (trait clair)

### 31

Commenter :

**311** la relation entre la profondeur de la nappe et l'évapo-transpiration. Dans quels sens varient-elles l'une par rapport à l'autre ?

**312** la relation entre la profondeur de la nappe et le débit. Ces variations peuvent-elles être considérées comme synchrones ? sinon pourquoi ?

**32**

Estimer par lecture sur le graphique (la cote de la nappe se lisant à droite en cm)  
l'amplitude de l'oscillation journalière de la nappe au cours des premières 24 heures

**Corrigé de l'exercice n° 2 hydrogéologie écosystèmes**

**1**

L'écoulement souterrain  
soutient le débit d'étiage quand  
la nappe communique avec la rivière

oui  non

Dans un milieu terreux, avec un liquide en  
charge le champ des vitesses de filtration  
dérive d'un potentiel hydraulique dit aussi charge

oui  non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

**2**

**21**

L'on sait que :  $I \text{ mm/an} = \frac{Q \text{ m}^3 / \text{sec.} \cdot 365 \text{ (jours)} \cdot 86\,400 \text{ (secondes)}}{S \text{ (km}^2)}$   
d'où le tableau infra :

année	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
lame mm	781	805	865	834	833	765	721	418	657	811	845	370	654	583

**22**

débit moyen sur la période de 14 ans :

$$\frac{102,8}{14} = 8,83 \text{ m}^3 / \text{sec.}$$

lame d'eau écoulée en moyenne sur ces 14 années :

$$\frac{8,83 \cdot 365 \cdot 86400 \cdot 10^{-3}}{392} = 710 \text{ mm/an} \quad S = 392 \text{ km}^2, 86\,400'' \text{ en 24 heures}$$

**23**

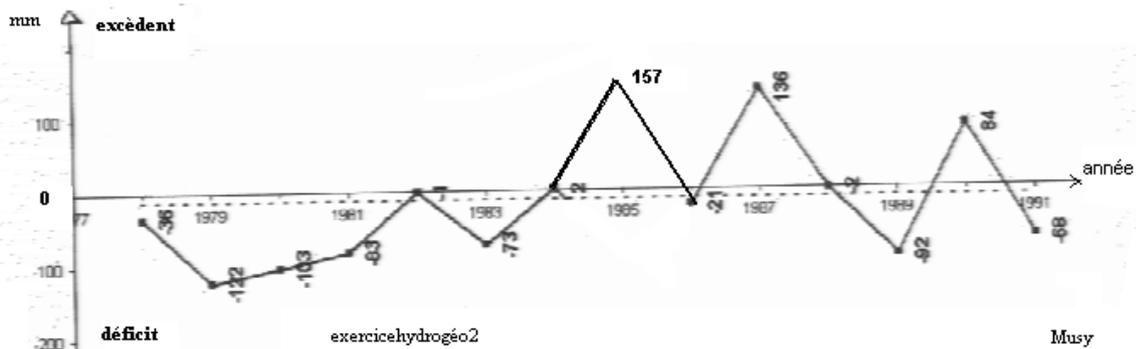
L'on sait que : déficit = pluviométrie – (évapotranspiration + écoulement) le tout en mm  
Il vient donc le tableau infra :

année	calcul	déficit
1978	1213 - (468 + 781)	- 36 mm
1979	1201 - (518 + 805)	- 122 mm

1980	1250 – (488 + 865)	- 103 mm
1981	1272 – (521 + 834)	- 83 mm
1982	1386 – (554 + 833)	- 1 mm
1983	1244 – (552 + 765)	- 73 mm
1984	1241 – (518 + 721)	2 mm
1985	1145 – (569 + 663)	157 mm
1986	1176 – (540 + 657)	- 21 mm
1987	1468 – (521 + 811)	136 mm
1988	1417 – (574 + 845)	- 2 mm
1989	892 – (614 + 370)	- 92 mm
1990	1373 – (635 + 654)	84 mm
1991	1118 – (603 + 584)	- 68 mm

## 24

A partir des chiffres calculés supra, l'on obtiendra le graphique infra



## 3

### 31

#### 311

Le graphique donné illustre la variation de la nappe phréatique pour laquelle une hauteur minimale correspond à une valeur maximale de l'évapotranspiration aux alentours de la mi-journée et inversement durant la nuit.

#### 312

Il est constaté qu'une hauteur minimale de la nappe phréatique engendre un débit minimal.

Mais à la différence de la relation nappe/ évapotranspiration, il existe cette fois-ci un temps de réponse du système de l'ordre de 6 heures indiquant une inertie importante pour le système nappe/débit

### 32

L'amplitude d'oscillation de la nappe phréatique, sur les premières 24 h, apparaît comme évidente, elle atteint 1,8 cm environ entre  $t = 12 \text{ h}$  (-1,4 cm) et  $t = 21 \text{ h}$  (0,4 cm)

## Exercice n° 3 hydrogéologie écosystèmes vidange de la nappe – profil hydrique – écoulement hypodermique

1

La capacité de rétention,  $\tau$ , c'est le volume d'eau emmagasiné dans la partie

supérieure du sol, 48 H après la fin de la pluie (temps de ressuyage)      oui      non

Elle représente une teneur en humidité du sol qui, sans apport nouveau, baissera      oui      non

Si  $z$  indique la profondeur, la courbe  $\tau = f(z)$  à une date donnée  
donne le profil hydrique, ou isochrone d'humidité du sol      oui      non

L'écoulement hypodermique apparaît quand la conductivité hydraulique latérale

du sous-sol devient supérieure à la conductivité hydraulique verticale      oui      non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

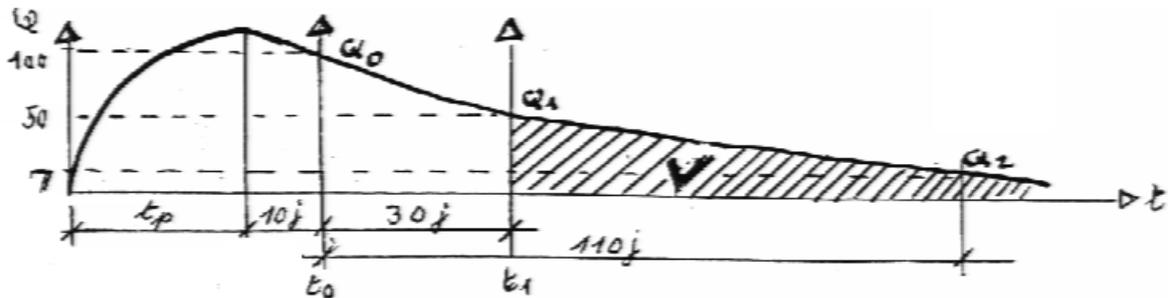


Une région subit une période de sécheresse de plusieurs mois. Après les 10 premiers jours sans pluie le débit  $Q_0$  du cours d'eau la drainant atteint ....  $100 \text{ m}^3 / \text{seconde}$ ,

30 jours après cette mesure et toujours sans pluie le débit  $Q_1$  n'atteint plus que .....  $50 \text{ m}^3 / \text{seconde}$ .

Sachant que selon la loi de Maillet le débit de tarissement du cours d'eau, cf. courbe infra, s'écrit :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (1)$$



exercicehydrogéo3

Musy

**21**

Calculez le coefficient  $\alpha$  à partir des mesures  $Q_0$  et  $Q_1$ . De là écrire l'équation de la courbe de tarissement du cours d'eau.

**22**

Avec cette équation calculez le débit probable  $Q_2$ , 110 jours après  $Q_0$

**23**

En considérant que la réserve de la nappe souterraine est donnée par l'expression

$$V = \int_0^{\infty} Q_t dt = Q_0 \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} dt \quad \text{en remplaçant } Q_t \text{ par sa valeur dans (1)}$$

$$V = Q_0 \left[ -\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} \right]_0^{\infty} = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (\text{si } t = 0, \text{ origine des temps})$$

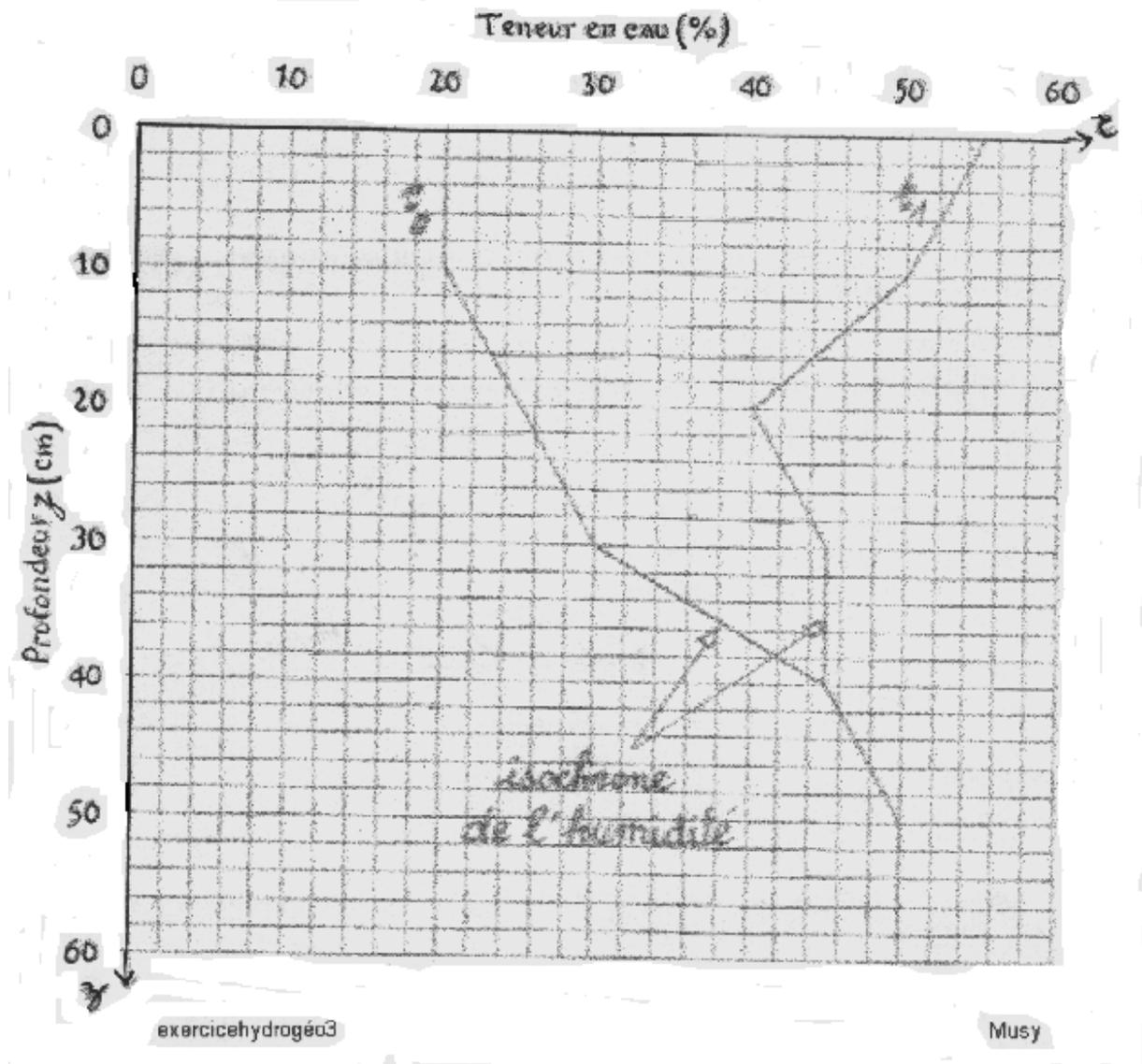
$\alpha$

$\alpha$

estimez la réserve d'eau en  $m^3$  de la nappe souterraine le jour de la mesure de  $Q_1 = 50 m^3 /$  seconde devenant origine des temps ; lorsque cette réserve sera épuisée la nappe sera donc vidangée.

**3**

À partir des deux profils hydriques relevés avant ( $t_0$ ) et 48 h après ( $t_1$ ) un épisode pluvieux, figurant sur le graphique infra



il vous est demandé la précipitation exprimée en mm d'eau, qui a provoqué la variation d'humidité (capacité de rétention) observée dans le sol.

Sachant que :

- le coefficient d'écoulement (ruissellement) dans cette situation  $K = 0,25$ , ce qui correspond en ville à des lotissements et en campagne à des sols sablo-argileux sans végétation,
- L'aire entre les deux courbes isochrones de la teneur en eau (ou profils hydriques) représente l'eau infiltrée elle s'écrit algébriquement 
$$V = \int_0^{40} [\tau_{t1} - \tau_{t2}] dz$$

pour l'estimer il est précisé qu'un carré du graphique supra représente 0,4 mm de hauteur d'eau,

- l'on suppose que

la lame d'eau précipitée = lame d'eau infiltrée + lame d'eau ruisselée,

et que l'évaporation doit être considérée comme nulle ainsi que le stockage en surface.

*N.B.* :  $\tau$  s'exprime en  $\text{m}^3$  d'eau /  $\text{m}^3$  de terre et l'aire entre les deux isochrones correspond à l'eau infiltrée

## Corrigé de l'exercice n° 3 hydrogéologie écosystèmes

1

La capacité de rétention,  $\tau$ , c'est le volume d'eau emmagasiné dans la partie supérieure du sol, 48 H après la fin de la pluie (temps de ressuyage)

oui

non

Elle représente une teneur en humidité du sol qui sans apport nouveau baissera

oui

non

Si  $z$  indique la profondeur, la courbe  $\tau = f(z)$  à une date donnée donne le profil hydrique, ou isochrone d'humidité du sol

oui

non

L'écoulement hypodermique apparaît quand la conductivité hydraulique latérale du sous-sol devient supérieure à la conductivité hydraulique verticale  oui  non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

**2**

21

L'on sait que :

$$Q_1 = Q_0 e^{-\alpha t}$$

donc

$$\ln Q_1 = \ln Q_0 - \alpha t \ln e$$

$$\ln 0,5 = -30 \alpha$$

$$\alpha = 0,0232$$

$$\text{et } Q_t = Q_0 e^{-0,0232 t}$$

**22**

Prenons l'origine en  $Q_0$ :

$$Q_2 = Q_0 e^{-0,0232 \cdot 110}$$

donc

$$\ln Q_2 = \ln 100 - 2,56 \ln e$$

et

$$Q_2 = 7,87 \text{ m}^3 / \text{sec.}$$

**23**

Prenons l'origine en  $Q_1$

$$Q = Q_1 \left[ \frac{-1}{\alpha} \cdot e^{-\alpha t} \right]_0^{\infty}$$

$\alpha$

donc

$$Q = \underline{Q_0}$$

$\alpha$

et réserve de vidange

$$V = \underline{Q_0} \cdot 86\,400$$

(86 400 secondes en 1 jour)

$\alpha$

d'où

$$V = 187\,826\,080 \text{ m}^3 \text{ en réserve ce jour là}$$

ce volume représente aussi la capacité d'emmagasinement du bassin-versant

**3**

L'aire entre les deux courbes isochrones de la teneur en eau (ou profils hydriques) représente l'eau infiltrée, s'écrit algébriquement

$$V = \int_0^{40} [\tau_{t1} - \tau_{t2}] dz$$

en mm elle s'élève à : 193 carrés. 0,4 mm = 77,25

le coefficient de ruissellement  $K = 0,25$  donc l'eau infiltrée représente 75 % de la pluie tombée d'où précipitation tombée :

$$77,25 / 0,75 = 103 \text{ mm environ}$$

0,75

## Exercice n° 4 hydrogéologie écosystèmes

**Nappes captives – strates aquifères- débit d'un puits**

**1**

Une nappe captive n'est alimentée que par une partie de sa surface      oui                  non

Une strate aquifère sableuse est dite perméable en petit                  oui                  non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

**2**

Dressez un tableau mentionnant - pour la production d'eau potable -les avantages et les inconvénients de l'exploitation d'une nappe souterraine (**puits**) par rapport à une prise d'eau **en rivière**, en se fondant sur les critères

- de la qualité de l'eau : MES (turbidité) et pollution organique et chimique (colibacille, nitrates ...)

- des dispositions techniques subséquentes à chacun des deux systèmes

**3**

La représentation de la colonne stratigraphique obtenue par un forage en haute Normandie ( proche du bassin Parisien ) indique que plusieurs strates géologiques s'avèrent susceptibles d'être aquifères, cf. document au dos.

**31 .**

Indiquez deux strates aquifères puis expliquez pourquoi elles présentent ce caractère.

**32 .**

Pour la nappe la plus proche du sol, précisez s'il s'agit d'une nappe captive ou libre

**33 .**

Quel serait le probable mode d'alimentation de ladite nappe ?

**Colonne stratigraphique du forage des Hogues, (atlas hydrogéologique de l'Eure)**

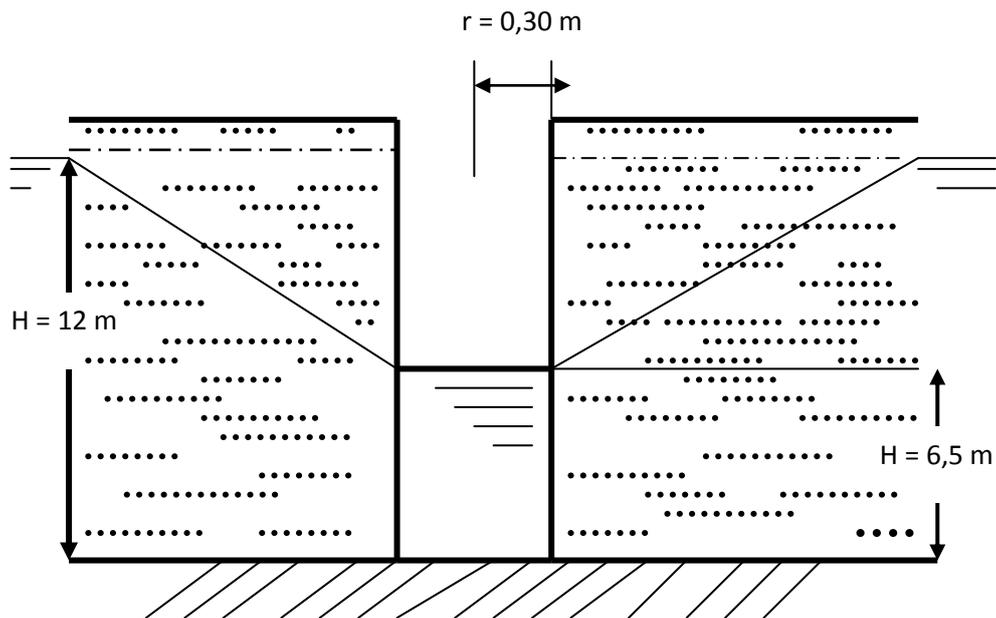
Cote NGF

	+ 159	Limons et argiles à silex	Quaternaire
	+ 67	Craie fissurée à silex	Senonien
	- 22	Craie fissurée	Turonien
	- 50	Craie	Cénomaniens
	- 90	Argile du Gault	Albien sup.



- que la position initiale de la nappe avant pompage était à 12 m au-dessus du roc,
- que le milieu poreux considéré possède un coefficient de perméabilité  $K$  de ...  $2 \cdot 10^{-4}$  m/sec.

Cf. schéma *infra*



Exercicehydrogé04  
(Canada)

Université Laval

## Corrigé de l'exercice n° 4 hydrogéologieécosystèmes

1 Une nappe captive n'est alimentée que par une partie de sa surface

ou

non

Une strate aquifère sableuse est dite perméable en petit

ou

non

## 2

critères	Prise en rivière	puits
Turbidité de l'eau	Forte lors des crues	Très faible car filtration naturelle
Colibacille, nitrates etc....	Arrivent directement	Arrivée retardée par filtration
Dispositifs techniques	Nécessité de filtres à sables (MES) Pompes à faible hauteur d'exhaure	Pas de filtres à sable Souvent forte hauteur d'exhaure

## 3

### 31

Strates aquifères : l'Albien entre 90 et 139 mètres de profondeur ( présence de sable)

le Séquanien entre 383 et 485 mètres de profondeur (présence de sable)

### 32

La nappe la plus proche du sol dite de l'Albien est une nappe captive qui jaillit dans Paris, elle y alimente avec de l'eau à 21 ° la piscine de la Butte aux Cailles

### 33

Son alimentation proviendrait de la Normandie, l'eau s'écoulant sous les couches du Bassin parisien

## 4

L'on sait que :

15 .

$$Q = 2\pi r h \sqrt{K}$$

il vient

$$Q = 2.3,14.0,3.6,5. \sqrt{2. 10^{-4}}$$

15

et

$$Q = 0,011 \text{ m}^3 / \text{sec.} \quad \text{ou} \quad 11 \text{ litres /sec.}$$

## Exercice n° 5 hydrogéologieécosystèmes

## Conservation de la masse, continuité– bilan hydrologique - arène granitique

### 1

Une arène est un terrain provenant de la destruction du granit essentiellement sableux avec des particules d'argile oui non

Une arène est dite perméable "en petit" (milieu poreux) oui non

Les captages d'eau dans des arènes granitiques s'avèrent en général peu productifs oui non

### *Cerclez la réponse que vous estimez juste*

Dessiner une coupe dans une arène granitique

### 2

Complétez le tableau infra

#### *Bilan hydrologique de l'année 1999 sur le nord du massif central*

Mois	Pluie mm	Etp mm	Pluie – Etp mm	Coefficient Ecoulement	Ecoulement sup. et sout. mm	Etp + Ecoulement mm	Déficit mm	Réserve mm
1	2	3	4	5	5 x 2	6	2 – 6 corrigé	
Janv.	125	0	125	1		.		50
Fév.	108	0	108	1				50
Mars	110	13	97	0,88				50
Avril	81	50	31	0,38				50
Mai	124	72	52	0,41				50
Juin	97	81	16	0,16				50
Juil.	73	120	- 47	0				
<i>Août</i>	100	106	- 6	0				
Sept.	101	70	31					
Oct.	110	35	75					
Nov.	121	13	108					
Déc.	135	0	135					50

### 21

en calculant la situation de la réserve d'eau en juillet et en août

### 22

en estimant les réserves reconstituées en septembre, octobre, novembre et décembre pour atteindre approximativement le maximum soit 50 mm en décembre ce qui implique le choix d'un coefficient d'écoulement superficiel et souterrain pour chacun de ces 4 derniers mois.

et sachant que

QUE l'équation de conservation de la masse (continuité) s'écrit

Pluies + réserves = évapotranspiration + écoulement superficiel et souterrain + réserves  $\pm$  variation de réserves

$$\text{Evapotranspiration} = \text{pluie} - \text{écoulement superficiel et souterrain} \pm \text{variation de réserves} \quad (1)$$

QUE l'on pose

$$\text{déficit hydrologique} = \text{pluie} - (\text{évaporation} + \text{écoulement}) \quad \text{si variation de réserves nulle} \quad (2)$$

QUE

le coefficient d'écoulement superficiel et souterrain varie de 1 à 0 de janv. à juin inclus ( la réserve reste constante = 50 mm)

ledit coefficient devient nul en juillet et août car Etp > pluies, donc tarissement de l'écoulement et vidange de la réserve

de septembre à décembre ce coefficient variera pour reconstituer la réserve de façon qu'elle atteigne approximativement 50 mm en décembre ( valeur maximale pour ce sol très sableux donc très drainant)

## Corrigé de l'exercice n° 5 hydrogéologie écosystèmes

### 1

Une arène est un terrain provenant de la destruction du granit essentiellement sableux avec des particules d'argile

oui

non

Une arène est dite perméable "en petit" (milieu poreux)

oui

non

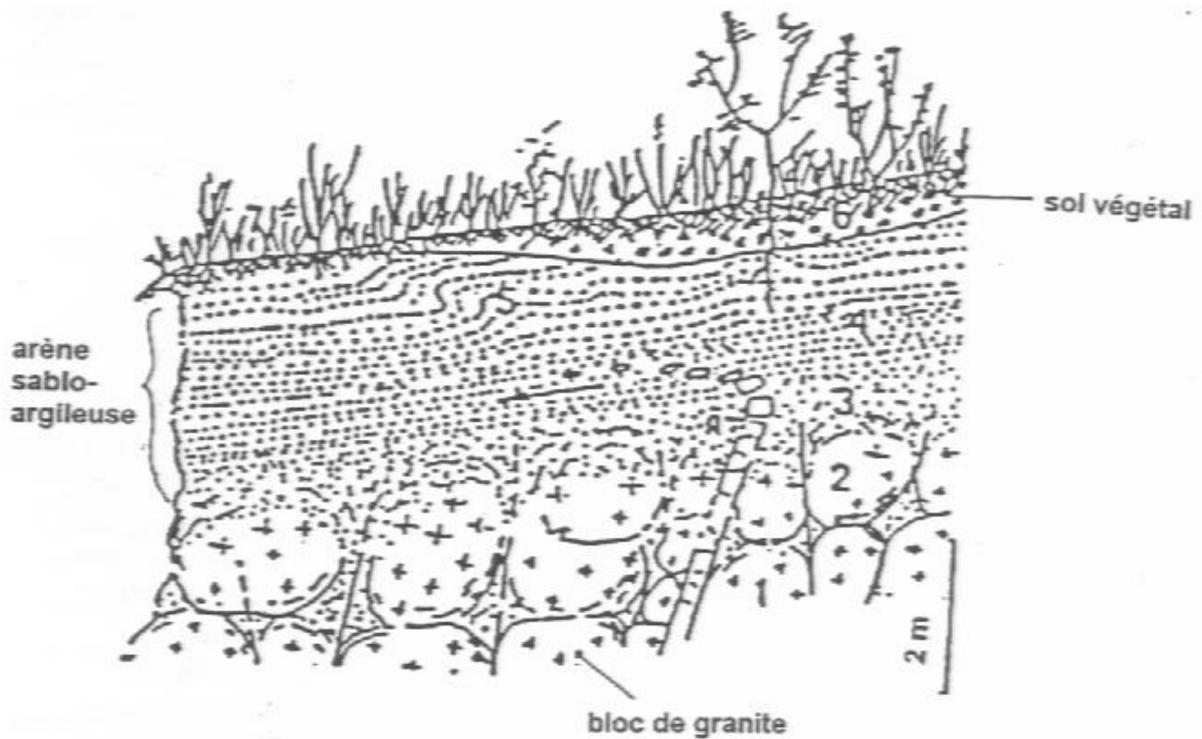
Les captages d'eau dans des arènes granitiques s'avèrent en général peu productifs

oui

non

*Cerclez la réponse que vous estimez juste*

Voir le croquis *infra* représentant une coupe dans une arène morvandelle



exercicehydrogé05

2

Voir *infra* le tableau complété

**Bilan hydrologique de l'année 1999 sur le nord du massif central**

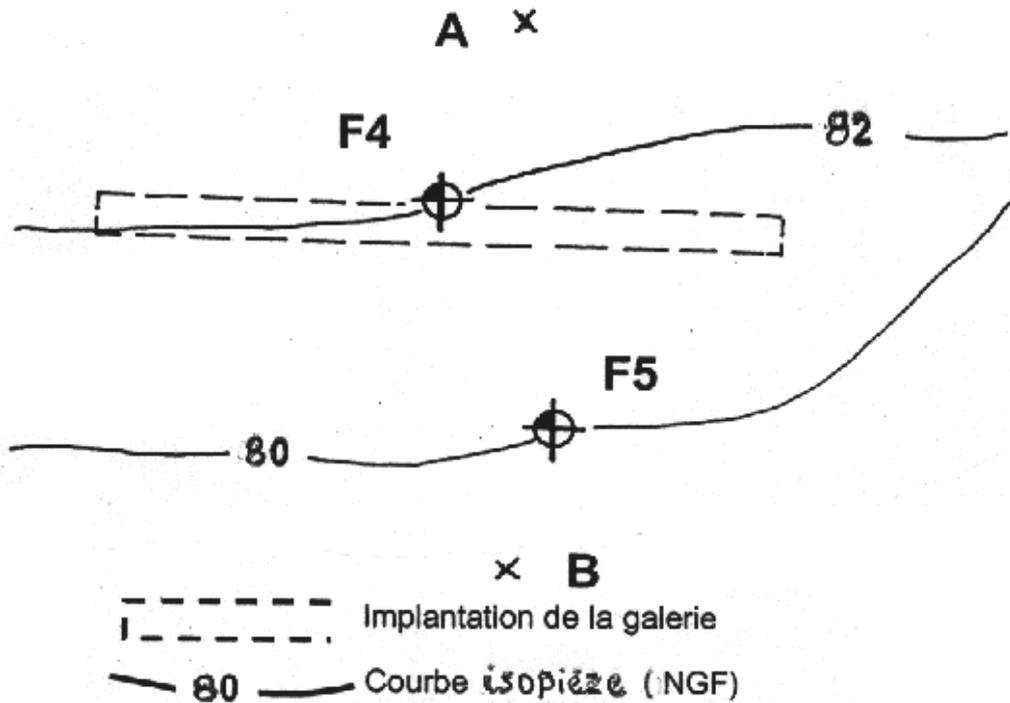
Mois	Pluie mm	Etp mm	Pluie – Etp mm	Coefficient Ecoulement	Ecoulement sup. et sout. mm 5 x 2	Etp + Ecoulement mm 6	Déficit mm 2 – 6 corrigé	<i>Réserve</i> mm
1	2	3	4	5				
Janv.	125	0	125	1	<b>125</b>	<b>125</b>	<b>0</b>	50
Fév.	108	0	108	1	<b>108</b>	<b>108</b>	<b>0</b>	50
Mars	110	13	97	0,88	<b>97</b>	<b>110</b>	<b>0</b>	50
Avril	81	50	31	0,38	<b>31</b>	<b>81</b>	<b>0</b>	50
Mai	124	72	52	0,41	<b>52</b>	<b>124</b>	<b>0</b>	50
Juin	97	81	16	0,16	<b>16</b>	<b>97</b>	<b>0</b>	50
Juil.	73	120	- 47	0	<b>0</b>	<b>120</b>	<b>0</b>	<b>3</b>
<i>Août</i>	100	106	- 6	0	<b>0</b>	<b>106</b>	<b>- 3</b>	<b>0</b>
Sept.	101	70	31	<b>0,25</b>	<b>26</b>	<b>96</b>	<b>0</b>	<b>2</b>
Oct.	110	35	75	<b>0,58</b>	<b>64</b>	<b>99</b>	<b>0</b>	<b>13</b>
Nov.	121	13	108	<b>0,75</b>	<b>91</b>	<b>104</b>	<b>0</b>	<b>30</b>
Déc.	135	0	135	<b>0,85</b>	<b>115</b>	<b>115</b>	<b>0</b>	50

## Exercice n° 6 hydrogéologie écosystèmes

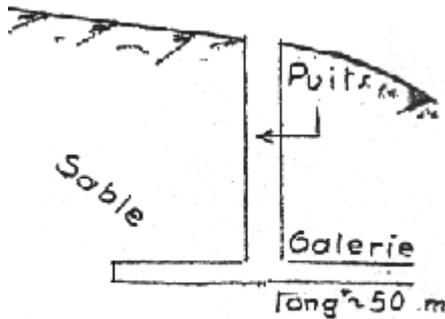
Iso pièzes - galerie de captage - potentiels capillaire et gravitaire

En Aquitaine, il fut réalisé des études hydrogéologiques au moyen de forages dans le dessein de déceler la présence de nappes libres dans la couche aquifère dite des "sables des Landes".  
Cf. carte infra

### Plan de situation des forages de reconnaissance



Ceci pour mettre en place une galerie de captage de 50 mètres de long destinée à recueillir l'eau et dans laquelle aboutiraient un puits dont les pompes immergées alimenteraient un réseau d'eau potable.



Cf. croquis ci-contre

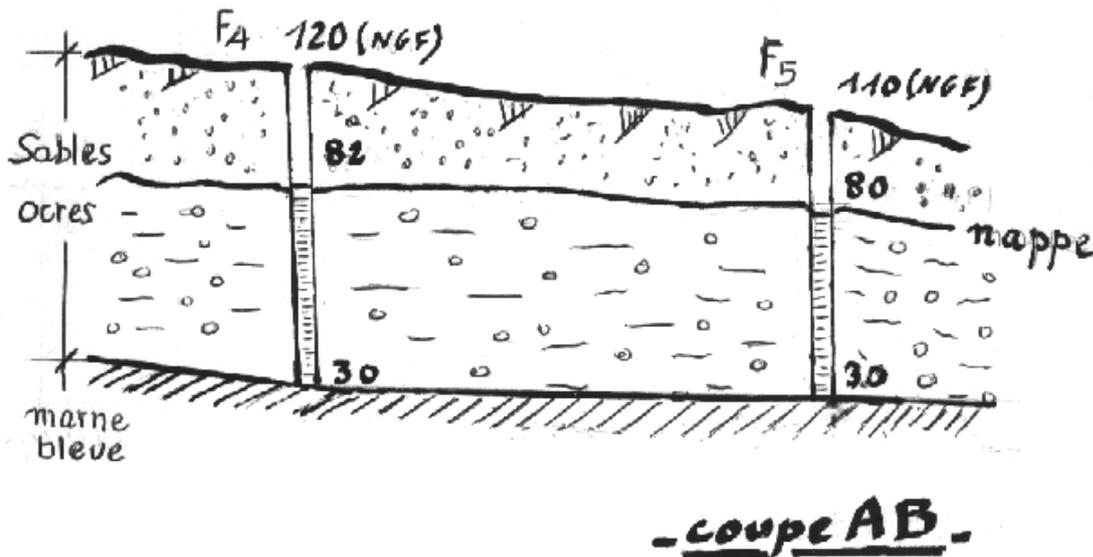
Les forages effectués indiquent le niveau statique de la nappe et les coefficients de perméabilité  $K$  des sols de la couche aquifère

Forage F 4 à l'altitude du sol de ..... 120 mètres ( NGF)

Niveau statique : 82 m soit une hydrohypse (profondeur) à  $-38$  m avec un coefficient  $K = 6.10^{-5}$  m/s

Forage F 5 à l'altitude du sol de ..... 110 mètres ( NGF)

Niveau statique : 80 m soit une hydrohypse (profondeur) à - 30 m avec un coefficient  $K = 5,9 \cdot 10^{-5}$  m/s



Ces tableaux s'expriment graphiquement selon la coupe *infra*

**1**

Indiquez sur la carte, où figurent les lignes isopièzes de la nappe, le sens de l'écoulement de l'eau en traçant les lignes de courant

**2**

Entre F4 et F5, l'on constate que le coefficient de perméabilité baisse de 6 à  $5,9 \cdot 10^{-5}$  m/s. Si l'on se trouve avec un intervalle d'isopièze constant et une section d'écoulement constante, selon la loi de Darcy est-ce-que ?

la vitesse d'infiltration et partant le débit baisseront

OUI

NON

Cerclez la réponse correspondant à votre opinion

**3**

En supposant que la puissante nappe dite des sables des Landes ne présente qu'un faible marnage (peu de variation dans le temps), l'on peut donc utiliser comme galerie de captage un ovoïde T 150, pourvu de barbacanes dans sa partie basse, pour l'entrée de l'eau et conduisant l'eau captée au puits où se trouvent les pompes immergées.<sup>137</sup>

<sup>137</sup> L'ovoïde de par sa forme, résiste bien aux pressions et de par sa hauteur, 1,5 m, permet de capturer l'eau malgré l'oscillation éventuelle de la nappe.

Cf. croquis ci-contre

L'on calera donc le haut de l'ovoïde à la cote 82 m (NGF).  
Les calculs de débit de la nappe ayant montré qu'elle  
apporterait dans ce cas avec un rabattement de 0,60m ( cote 81,4 m NGF) un débit de 4 litres au mètre environ  
soit de ... 200 l/s sur les 50 mètres d'ovoïde

Vérifions que ledit ovoïde doté d'une pente de  $1/^{00}$   
(0,001) est capable de véhiculer ce débit.

En première approximation considérons que l'ovoïde  
s'assimile à une section rectangulaire de hauteur 1,5 m , de  
largeur 0,90m avec un tirant d'eau de 0,90m à l'intérieur

### 31

Calculez la section mouillée  $\omega$

Calculez le périmètre mouillé  $\chi$

Calculez le rayon hydraulique  $R = \frac{\omega}{\chi}$

### 32

A partir de la formule de Manning Strickler  $u = K_s R^{2/3} I^{1/2}$

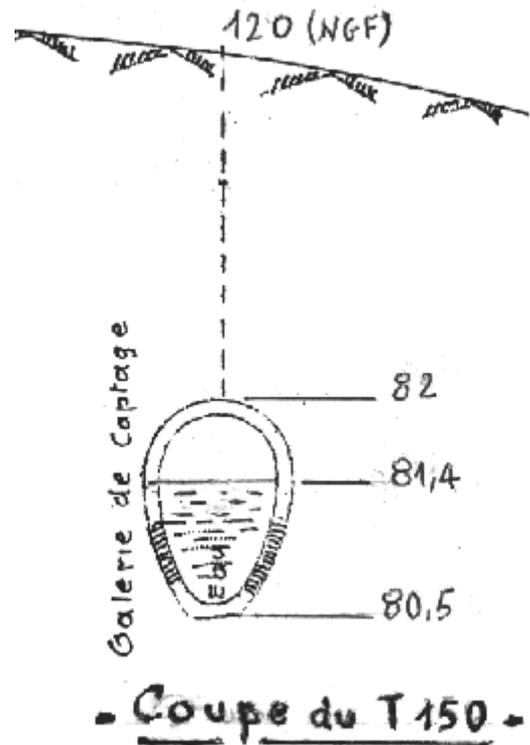
Calculez la vitesse , en prenant  $K_s$  égal à 75, coefficient de rugosité, correspondant à des conduites  
préfabriquées en béton ordinaire.

Calculez le débit puis lui appliquer un coefficient correctif de 0,63 pour tenir compte de la forme  
oblique de l'ovoïde, le résultat obtenu doit rester supérieur au débit capté 2 00 l / s.



Dans le sol d'une parcelle il a été mis en place à des profondeurs croissantes tous les 20 cm jusqu'à  
200 cm une série de piézomètres et de tensiomètres. Les données enregistrées par ces instruments à  
un instant donné t figurent au tableau infra

Profondeur par rapport à la surface du sol des appareils	Hauteur d'eau dans les piézomètres en cm	Tension de l'eau en centibar
20	0	100
40	0	60
60	0	10
80	0	20
100	0	35
120	0	10
140	0	5
160	0	0
180	20	0
200	40	0



Sachant que dans un système à la pression atmosphérique le potentiel hydraulique de l'eau (ou charge) s'écrit :

$$\text{Potentiel hydraulique de l'eau du sol} = H (\text{potentiel gravitaire}) + \psi (\text{potentiel capillaire})$$

et les équivalences des unités de pression

$$100 \text{ kPa} = 1 \text{ bar} = 10,22 \text{ m d'eau}$$

## 41

Convertir les chiffres de mesures de tension donnés en centibar en cm d'eau

## 42

Sachant que ces tensiomètres sont équipés de capteur de pression électronique donnant directement la valeur corrigée de  $\psi$  et en prenant comme plan de référence celui situé à 2 mètres de profondeur,

Calculez à chaque niveau de mesure, les valeurs du potentiel hydraulique total exprimées en cm de colonne d'eau et les présenter sous forme de tableau,

## Corrigé de l'exercice n ° 6 hydrogéologie écosystèmes

### 1

Les lignes de courant sont représentées par des droites perpendiculaires aux lignes isopièzes et dirigés selon les charges descendantes donc de A vers B

### 2

Entre F4 et F5, l'on constate que le coefficient de perméabilité baisse de 6 à  $5,9 \cdot 10^{-5}$  m/s. Si l'on se trouve avec un intervalle d'isopièze constant et une section d'écoulement constante, selon la loi de Darcy :

la vitesse d'infiltration et partant le débit baisseront

OUI  NON

Cerclez la réponse correspondant à votre opinion

### 3

#### 31

$$\omega = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81 \text{ m}^2$$

$$\chi = 2 \cdot 0,9 + 0,9 = 2,7 \text{ m}$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{0,81}{2,7} = 0,30$$

#### 32

$$u = K_s R^{2/3} l^{1/2} \text{ devient}$$

$$u = 75 \cdot 0,30^{2/3} \cdot 0,001^{1/2}$$

$$u = 1,08 \text{ m/s}$$

$$\text{mais } Q = u \cdot \omega$$

$$\text{et } Q = 1,08 \cdot 0,81$$

$$Q = 870 \text{ l/s}$$

Avec le coefficient de correction de 0,63 il vient

$$Q' = 870 \cdot 0,63$$

$$Q' = 548 \text{ l/s} \text{ supérieurs à } 200 \text{ l/s c. q.e.v.}$$

## 4 41

Centibar	100	60	10	20	35	10	5
centimètre	1000	600	100	200	350	100	50

## 42

avec l'origine à - 2 mètres : à une profondeur de - 1, 80 m l'on se trouve avec 20 cm eau

à une profondeur de - 1, 60 l'on se trouve avec 40 cm d'eau

La première mesure s'effectue à 0,20 m de profondeur donc à 1,80m dans la nouvelle référence.

Les valeurs fournies par le tensiomètre se trouvant déjà corrigées , point n'est besoin d'ajouter la pression de la colonne d'eau entre la coupelle poreuse et le capteur de pression.

Altitude par rapport au plan de référence à - 2 m	Potentiel hydraulique total en cm de colonne d'eau
180	1000
160	600
140	100
120	200
100	350
80	100
60	50
40	0
20	40
0	20

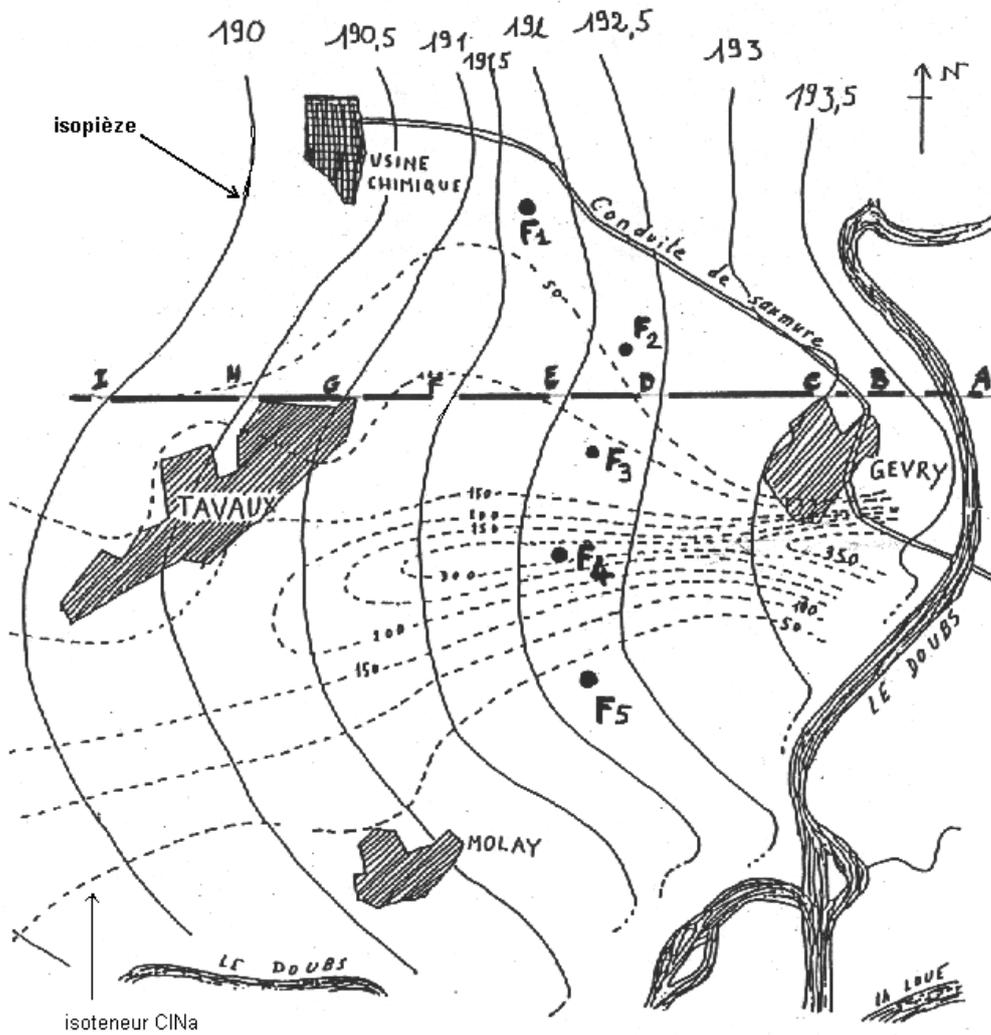
## Exercice n° 7 hydrogéologieécosystème

### Isopiète nappe alluvionnaire pollution chimique

En Franche – Comté en avril 1965 consécutivement à une pollution de la nappe alluvionnaire du Doubs par de la saumure, il fut procédé à :

des mesures piézométriques pour l'établissement des courbes isopiètes de ladite nappe, et à des courbes isoteneurs en sel

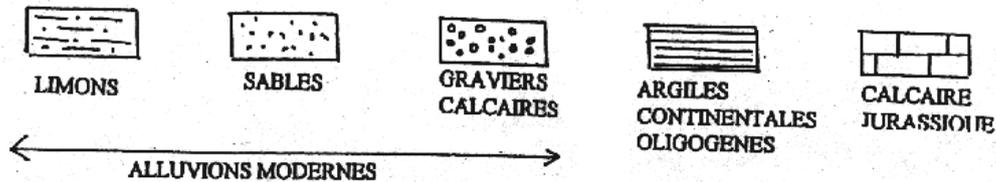
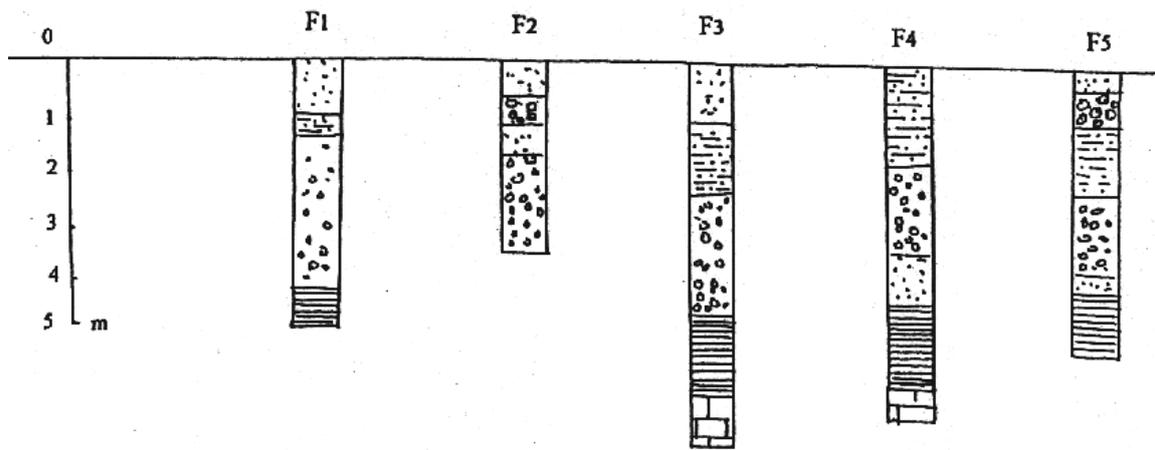
cf plan infra



Et aussi à :

la réalisation de cinq forages mécaniques destinés à connaître la structure des 5 premiers mètres du sol ,

cf. croquis infra



**1**

Un limon est composé d'argile et de grains de sable	Oui	Non
Un calcaire d'étage jurassien est une roche sédimentaire de l'ère secondaire	Oui	Non
Les graviers se trouvent à une profondeur plus grande que les sables dans une tranchée en zone alluvionnaire	Oui	Non

Cerclez la réponse correspondant à votre opinion

**2**

Tracez une coupe en travers selon **A1**, en indiquant le niveau de la nappe alluvionnaire et sachant que l'altitude en NGF du sol se répartit ainsi :

En B : 195,5 en C : 195 en D : 194,5 en E : 194 en F : 193,5 en G : 193 en H : 192,5 en I : 192 m

**3**

Indiquez l'alimentation de cette nappe quand le niveau du Doubs se situe à ..... 195 m et précisez dans quelles couches des alluvions modernes évolue la nappe.

**4**

Une pollution par du sel CINA a été décelée et analysée elle est représenté en mg/l par les courbes en pointillé du plan de situation. Elle provenait d'une conduite de saumure alimentant une usine chimique de soude. Positionnez le point d'origine de la pollution et indiquez d'une flèche le sens de déplacement de celle-ci sur le plan de situation.

**5**

Peut-on dire qu'ils'agit d'une pollution de type accidentelle	Oui	Non
de nature chimique	Oui	Non
à impact toxique	Oui	Non

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

## Corrigé de l'exercice n° 7 hydrogéologie écosystèmes

### 1

Un limon est composé d'argile et de grains de sable

Oui

Non

Un calcaire d'étage jurassique est une roche sédimentaire de l'ère secondaire

Oui

Non

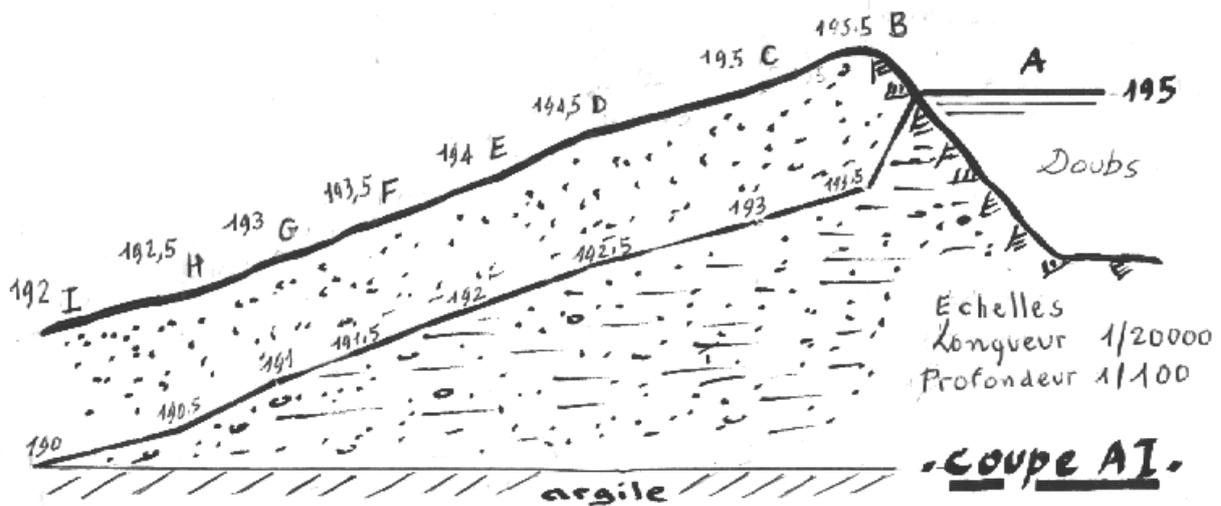
Les graviers se trouvent à une profondeur plus grande que les sables dans une tranchée en zone alluvionnaire

Oui

Non

### 2

L'on obtient la coupe infra



### 3

Cette nappe libre se trouve alimentée par le Doubs et elle se déplace dans les couches de graviers et de sables.

### 4

La fuite dans la conduite de saumure s'est produite au sud du village de Gevry et le déplacement de la salinité polluante s'effectue en direction de Tavaux.

### 5

Peut-on dire qu'il s'agit d'une pollution

de type accidentelle

Oui

Non

de nature chimique

Oui

Non

à impact toxique

Oui

Non

## Exercice n°8 hydrogéologieécosystèmes

### Ères géologiques- colonne stratigraphique- renouvellement des nappes

**1**

En France sur les 200 formations aquifères exploitables 175 sont dites libres et 25 captives

Oui Non

**2**

Le volume soutiré /an par les exploitations de la nappe libre sableuse de la plaine de Lyon atteint ...  
100 % du débit naturel

Celui soutiré /an par les exploitations de la nappe libre de la craie à Douai s'élève à ..... 97 % du  
débit naturel

Oui Non

**3**

Une formation aquifère sableuse constitue un milieu poreux appelé " perméable en petit "

Oui Non

**4**

Une formation aquifère calcaire (crayeuse par exemple) constitue un milieu fracturé appelé  
"perméable en grand"

Oui Non

**5**

Sachant que les ères géologiques s'élèvent à quatre, à la lumière de la colonne stratigraphique infra,  
peut-on dire :

- que la formation aquifère sableuse de l'Albien se situe dans l'ère secondaire (époque du crétacé)
- que la formation aquifère dite des calcaires de Campigny appartient à l'ère secondaire ( époque  
du paléogène)

Oui Non

**6**

L'eau se renouvelle au fil des ans, il existe un débit naturel au sein du réservoir (flux entrant, flux  
sortant) Sachant que le temps de renouvellement ... ..... = taille du réservoir  
débit naturel

le temps de renouvellement d'une nappe souterraine varie de ..... .... 300 ans à 1 500 ans

le temps de renouvellement d'un cours d'eau varie de ..... 12 jours à 20 jours

Oui Non

*Cerclez la réponse correspondant à votre opinion*

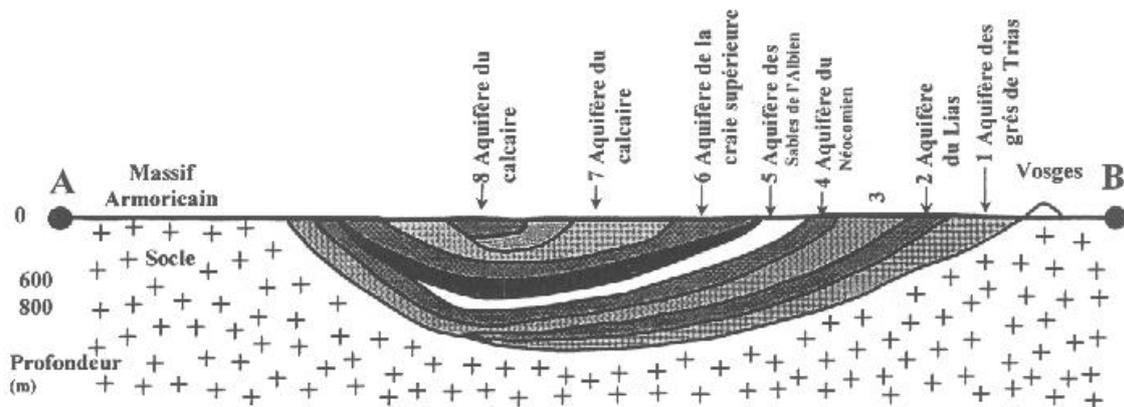
7

Un projet prévoit une installation industrielle à l'Ouest de Paris alimentée en eau par la nappe dite du Néocomien (formation calcaire) voir infra :

la coupe géologique Ouest-Est du bassin parisien,

la colonne stratigraphique subséquente à l'Ouest de Paris

**COUPE GEOLOGIQUE schématique passant par A et B**



**COLONNE STRATIGRAPHIQUE dans l'ouest parisien**

8	calcaire de Beauce	perméable
	argiles	imperméables
7	calcaire de Champigny	perméable
	marnes	imperméables
6	craie supérieure	perméable
	marnes argileuses	$K = 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$
5	sables de l'Albien	$K = 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$
	argiles gréseuses	$K = 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$
4	calcaire du Néocomien	$K = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$
	argiles	$K = 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$
3	calcaire du Jurassique m. et s.	perméable
	marnes	imperméables
2	calcaire marnéux du Lias	perméable
	marnes	imperméables
1	grès du Trias	perméable

## 71

Citez dans la colonne stratigraphique une nappe aquifère dans une formation poreuse et deux nappes aquifères dans une formation fracturée

## 72

Une relation serait-elle possible entre les aquifères Albien et Néocomien et si oui eu égard au coefficient K de la couche intermédiaire cette communication atteindrait-elle une forte importance ?

## 73

Sachant

que le temps de renouvellement mesuré expérimentalement atteint ... 1 000 ans , donc que le taux de renouvellement représente  $1/1000$  ( 0,001)

et que la taille du réservoir est estimée à ... 200 milliards de  $m^3$

Estimez l'impact sur le débit naturel de la nappe de l'installation industrielle qui extraira ... 2,7 millions de  $m^3$ /an

## Corrigé de l'exercice n° 8 hydrogéologie écosystèmes

**1**

En France sur les 200 formations aquifères exploitables 175 sont dites libres et 25 captives

Oui

Non

**2**

Le volume soutiré /an par les exploitations de la nappe libre sableuse de la plaine de Lyon atteint ...  
100 % du débit naturel

Celui soutiré /an par les exploitations de la nappe libre de la craie à Douai s'élève à ..... 97 % du  
débit naturel

Oui

Non

**3**

Une formation aquifère sableuse constitue un milieu poreux appelé " perméable en petit "

Oui

Non

**4**

Une formation aquifère calcaire (crayeuse par exemple) constitue un milieu fracturé appelé  
"perméable en grand"

Oui

Non

**5**

Sachant que les ères géologiques s'élèvent à quatre , peut-on dire :

- que la formation aquifère sableuse de l'Albien se situe dans l'ère secondaire (époque du crétacé)
- que la formation aquifère dite des calcaires de Campigny appartient à l'ère secondaire ( époque du paléogène)

Oui

Non

**6**

L'eau se renouvelle au fil des ans. Sachant que le temps de renouvellement =  $\frac{\text{taille du réservoir}}{\text{débit naturel}}$

le temps de renouvellement d'une nappe souterraine varie de ..... .... 300 ans à 1 500 ans

le temps de renouvellement d'un cours d'eau varie de ..... 12 jours à 20 jours

Oui

Non

**7**

**71**

nappe aquifère poreuse : sables de l'Albien

nappes aquifères fracturées : calcaire du Néocomien, calcaire de Champigny

## 72

L'existence de grès dans l'argile séparant l'Albien du Néocomien donne à penser qu'il peut exister un échange entre ces deux nappes, mais eu égard au très faible coefficient de perméabilité desdites argiles

gréseuses....  $K = 10^{-7}$  m/s il devrait être très limité.

## 73

On sait que temps de renouvellement =  $\frac{\text{taille du réservoir}}{\text{débit naturel}}$  (1)

Ici le temps de renouvellement = 1 000 ans puisque le taux de renouvellement est de 1 pour 1 000

En partant de (1)  $1\ 000 = \frac{200 \text{ milliards de } m^3}{\text{débit naturel}}$

d'où  $10^3 = \frac{200 \cdot 10^9}{\text{débit naturel}}$

et  $\text{débit naturel} = 200 \cdot 10^6 m^3 / \text{an}$

Si l'on rapporte ce chiffre à celui de l'extraction de l'industrie 2,7 millions de  $m^3 / \text{an}$

Il vient  $\frac{2,7 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^6}$

donc la zone industrielle ne provoquera qu'un faible impact sur le débit naturel de l'ordre de ...1,35 %

## Exercice n° 9 hydrogéologie écosystèmes

### Nappe profonde – artésianisme - horizon aquifère perméable en grand

1

Dans le département de la Gironde , sis dans un bassin sédimentaire dit aquitain les ressources en eau proviennent pour des raisons d'hygiène des nappes profondes et non pas de la nappe phréatique ou des sources

Oui

Non

2

Les sables du Miopliocène  
 voir colonne stratigraphique ci-contre  
 constituent un milieu poreux " perméable en  
 ' petit "

Oui

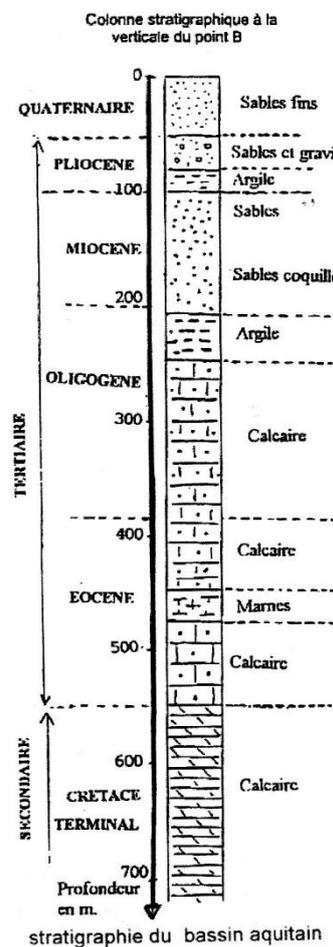
Non

3

Les calcaires de l'Oligocène inférieur et de  
 l'éocène supérieur ;  
 voir colonne stratigraphique ci-contre  
 constituent un milieu fracturé " perméable en  
 grand "

Oui

Non



4

Pour une nappe phréatique, libre, la surface piézométrique correspond à celle de la zone saturée de l'horizon aquifère où la pression de l'eau = la pression atmosphérique  
 selon Bernoulli charge = z (énergie de position)

Oui

Non

Pour une nappe captive, la surface piézométrique correspond au toit de l'horizon aquifère selon Bernoulli charge =  $z$  (énergie de position) +  $\frac{p}{\rho g}$  (énergie de pression)

$\rho g$

Oui

Non

## 5

Au point A, l'eau est captée par un puits à une profondeur de ... 30 mètres, cf. carte infra

Oui

Non

Au point B, l'eau est artésienne et jaillit jusqu'à.....5 mètres au-dessus de la surface du sol, cf. carte infra

Oui

Non

## 6

La distance  $n_p A - n_p B$  représente la perte de charge dans le parcours souterrain de l'eau depuis la zone d'alimentation au point A et le captage B, elle est égale à  $180 - 10 = 170$  mètres

Oui

Non

En cas d'excès de captation en B donc si la perte de charge devient  $170 + 5 = \dots 175$  mètres, l'artésianisme cessera, la dite perte de charge devenant trop forte

Oui

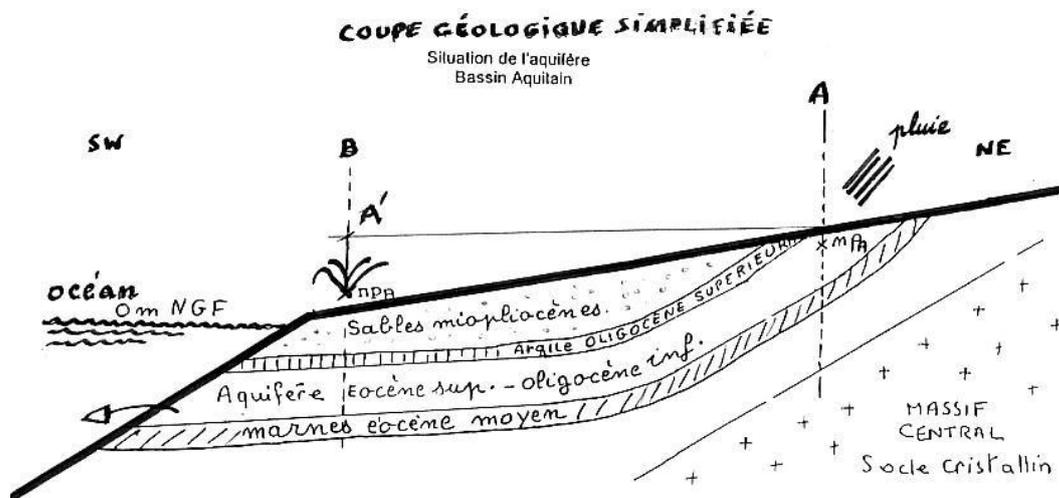
Non

## 7

L'alimentation de l'aquifère s'effectue à partir des pluies tombant dans la région de A, l'eau se déplace dans l'horizon aquifère en direction de l'eau où elle se perd à moins que d'être captée au niveau de B.

Oui

Non



$n_p A$ : niveau piézométrique en A à 150 m NGF altitude A: 180m  
 $n_p B$ : niveau piézométrique en B à 10 m NGF altitude B: 5m

coupe du bassin aquitain

## Corrigé de l'exercice n ° 9 hydrogéologie écosystèmes

### 1

Dans le département de la Gironde , sis dans un bassin sédimentaire dit aquitain les ressources en eau proviennent pour des raisons d'hygiène des nappes profondes et non pas de la nappe phréatique ou des sources

Oui

Non

### 2

Les sables du Miopliocène , voir colonne stratigraphique ci-contre , constituent un milieu poreux " perméable en petit "

Oui

Non

### 3

Les calcaires de l'Oligocène inférieur et de l'éocène supérieur ; voir colonne stratigraphique *infra*, constituent un milieu fracturé " perméable en grand "

Oui

Non

### 4

Pour une nappe phréatique, libre, la surface piézométrique correspond à celle de la zone saturée de l'horizon aquifère où la pression de l'eau = la pression atmosphérique

selon Bernoulli charge = z (énergie de position)

Oui

Non

Pour une nappe captive, la surface piézométrique correspond au toit de l'horizon aquifère

selon Bernoulli charge = z (énergie de position) +  $\frac{p}{\rho g}$  (énergie de pression)

$\rho g$

Oui

Non

### 5

Au point A , l'eau est captée par un puits à une profondeur de ... 30 mètres , cf . carte infra

Oui

Non

Au point B, l'eau est artésienne et jaillit jusqu'à.....5 mètres au-dessus de la surface du sol, cf .carte infra

Oui

Non

## 6

La distance  $A' n_p B$  représente la perte de charge dans le parcours souterrain de l'eau depuis la zone d'alimentation au point A captage A et le captage B, elle est égale à  $180 - 10 = 170$  mètres

Oui

Non

En cas d'excès de captation en B donc si la perte de charge devient  $170 + 5 = \dots 175$  mètres, l'artésianisme cessera, la dite perte de charge devenant trop forte

Oui

Non

## 7

L'alimentation de l'aquifère s'effectue à partir des pluies tombant dans la région de A, l'eau se déplace dans l'horizon aquifère en direction de l'eau où elle se perd à moins que d'être captée au niveau de B.

Oui

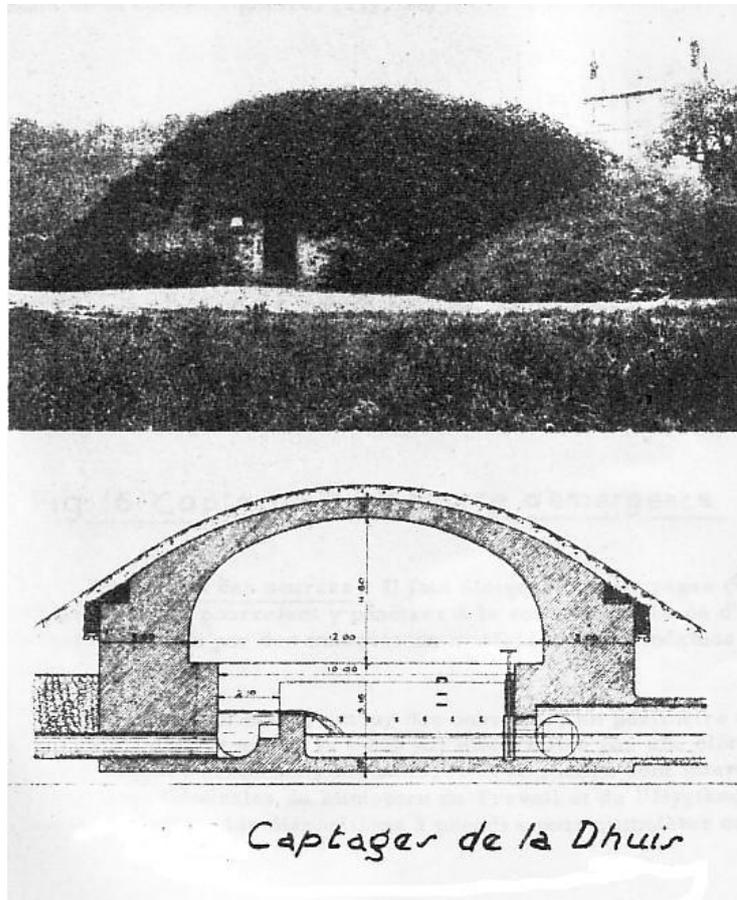
Non



## Addendum n°1

# Cours de captages de l'eau

- 1 Recherche des sources et des nappes souterraines
- 2 Critères quantitatifs et qualitatifs des eaux
- 3 Technologie, exploitation des ouvrages de captage
- 4 Protection des ressources



# 1 Recherche des sources et des nappes souterraines

La terre indique la présence des eaux  
La terre à potier enlève toute espérance  
d'en trouver..... Pline l'Ancien <sup>138</sup>

## 11 Historique

Si le repérage des cours d'eaux reste aisé, l'on ne peut en dire autant des sources et plus encore pour les nappes souterraines.

De toute antiquité, les peuples comme les philosophes se montrèrent attentifs à l'observation des phénomènes qui pouvaient conduire à la découverte de ce précieux élément. La citation en exergue tirée de Pline l'ancien dans son livre *Naturalis Historia* en témoigne.

Plus près de nous, Bernard Palissy dans son Discours admirable au chapitre " De la nature des eaux et des fontaines " écrivait en 1580 : "... les eaux de pluie qui tombent par les montagnes, terriers et toutes places qui ont inclinasion vers le côté des rivières ou fontaines ne s'y rendent pas si soudain. Car si ainsi était, toute source tarirait en été..... "

La recherche de l'eau resta longtemps empirique, l'on songe à la baguette divinatoire des sourciers ou aux observations portant sur l'aspect de la flore des terrains ou bien sur la fonte plus rapide de la neige en des endroits humides, qui déterminaient le lieu de creusement d'un puits.

## 12 Prospection géologique

### 12. 1 Codification :

De nos jours, ce mode de prospection a été officialisé et codifié dans les "Instructions générales relatives aux eaux d'alimentation". En bref elles précisent que :

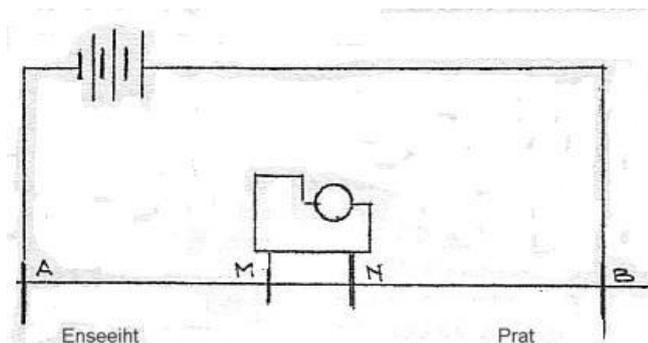
- l'étude portera en premier lieu sur les ressources offertes par les gisements souterrains : connaissance du périmètre d'alimentation, étude géologique préalable, courbes isopièzes
- le relèvement de toutes les causes de souillure sera effectué, ainsi que les températures de l'eau des émergences et des puits
- l'examen chimio - bactérien interviendra,
- les forages de reconnaissance seront effectués en tant que de besoin, les variations de débit et de pression seront rapprochées de la pluviosité.
- Si les signes extérieurs cités supra 11 ne permettent pas d'aboutir à des conclusions assez précises pour engager sans trop de risques la dépense que nécessite un forage de reconnaissance ; on utilisera les méthodes géo-physiques qui, depuis la surface, permettront de vérifier certaines hypothèses déduites de l'étude géologique.

### 12. 2 Prospection électrique :

Les minéraux se montrant d'excellents isolants, le courant électrique ne pourra passer que par l'eau dont sont plus ou moins imprégnés les terrains.

On mesurera la résistivité d'un terrain en injectant dans le sol en deux points A et B, un courant continu et en enregistrant la d.d.p. entre M et N puis en utilisant  $V = R I$

Si le terrain est homogène la résistivité électrique reste identique entre A et B

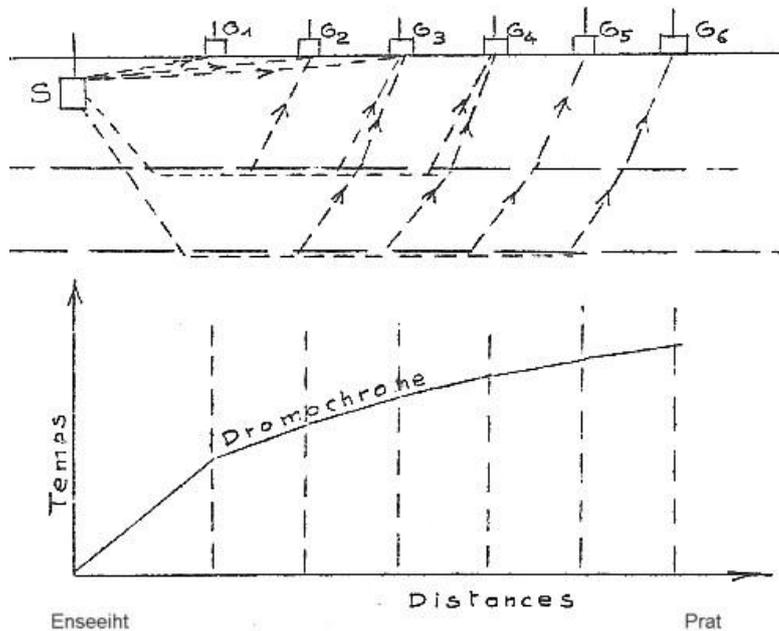


<sup>138</sup> Pline l'Ancien ( 23 – 79 ), naturaliste , vulcanologue mourut en observant une éruption du Vésuve

Par exemple :  $\rho_{\text{argile}} = 1 \text{ à } 10 \Omega\text{m}$  et  $\rho_{\text{sable}} = 400 \text{ à } 1\,000 \Omega\text{m}$

### 12.3 Sismique réfraction :

Une source sonore (charge d'explosif) envoie des ondes vers des récepteurs appelés géophones.



On trace la courbe dromochrone représentant le temps mis par les ondes pour arriver aux géophones en fonction de la distance

On calcule les vitesses de transmission du son qui seront interprétées pour définir la nature du sol.

Cf. croquis ci-contre

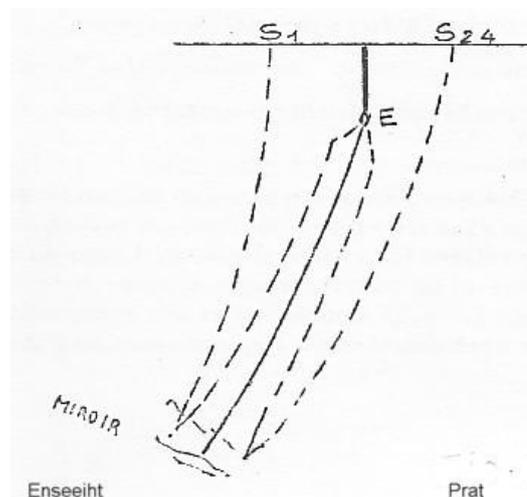
### 12.4 Sismique réflexion:

Des géophones, au nombre de 24, placés très près les uns des autres, enregistrent l'arrivée des ondes réfléchies en profondeur par des couches géologiques appelées miroirs.

La position de ces miroirs est déterminée en fonction de la vitesse du son, que l'on connaît, et des temps mesurés.

On peut relever ainsi la forme du lit d'un glacier, la profondeur et le profil du fond des océans etc...

f. croquis ci-contre



### 12.5 Prospection magnétique :

Elle consiste à mesurer la composante verticale du champ magnétique terrestre dont les anomalies décèlent la présence de masses magnétiques ou le passage d'une nappe souterraine en mouvement. Cette prospection s'effectue par avion au moyen de magnétomètres donnant la valeur du champ total.

### 12.6 La gravimétrie :

On mesure l'intensité de la pesanteur et on déduit des anomalies constatées, la présence de terrains ayant une plus ou moins grande densité, ce qui permet d'en apprécier la nature.

### 12.7 Utilisation des résultats des campagnes de mesures

Les résultats seront remis au géologue officiel chargé, en vertu des instructions du Conseil supérieur d'hygiène publique de France, de l'enquête réglementaire.

## 2 Critères quantitatifs et qualitatifs des eaux de distribution

### 21 Débit des nappes souterraines :

Le débit d'une nappe souterraine captée par galerie ou par puits sera fonction de la vitesse d'écoulement de l'eau dans la partie du terrain aquifère intéressé par l'ouvrage.

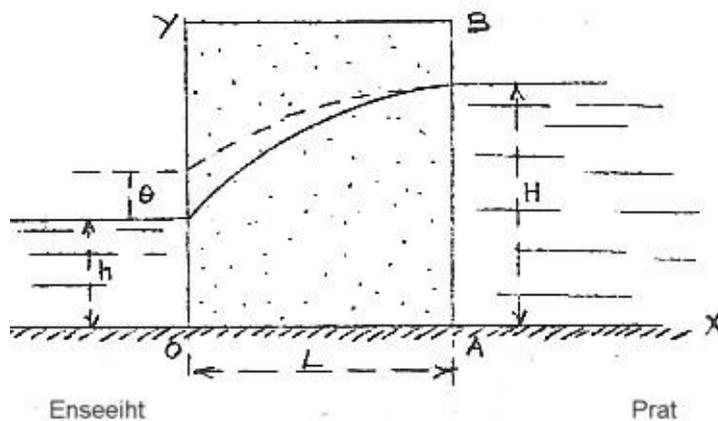
on sait que  $Q = V \cdot S$   $V$  : vitesse d'infiltration,  $S$  : section d'écoulement  
mais selon Darcy  $V = K \cdot \frac{\Delta h}{l}$   $K$  : coeffi. de perméabilité  $h$  : perte de charge

le débit  $Q = K \cdot \frac{\Delta h}{l} \cdot S$   
 $l$  : épaisseur de la couche traversée

#### 21. 1 Cas de la galerie

Soit une couche aquifère reposant sur un plan imperméable Ox. Considérons une tranche de ce massif limité par deux plans verticaux Oy et AB distants de L. Ouvrons une tranchée à gauche de Oy. L'eau s'écoulera de la face amont AB sur laquelle elle atteindra une hauteur H vers la face aval Oy sur laquelle cette hauteur est ramenée à h.

$$Q = \frac{K(H+h)}{L} (H-h) \quad \text{selon Dupuit}$$



La valeur du débit s'avère donc :  
proportionnelle

à la dénivellation maximale  $H - h$   
et à hauteur moyenne de l'eau  $\frac{H + h}{2}$

inversement proportionnelle

à la largeur L du massif

cf.. croquis ci-contre

#### 21. 2 Cas du puits :

Soit un massif aquifère ABCD, ayant la forme d'un cylindre vertical posé sur un plan horizontal imperméable Ox. Soit L le rayon extérieur du massif filtrant dans laquelle la nappe atteint la valeur constante H. On creuse un puits de rayon r. Si on extrait le volume Q, la hauteur d'eau dans le puits sera h.

$$Q = \frac{2k \pi (H-h)(H+h)}{\ln \frac{L}{r}} \quad \text{selon Dupuit}$$

La valeur du débit s'avère donc proportionnelle :

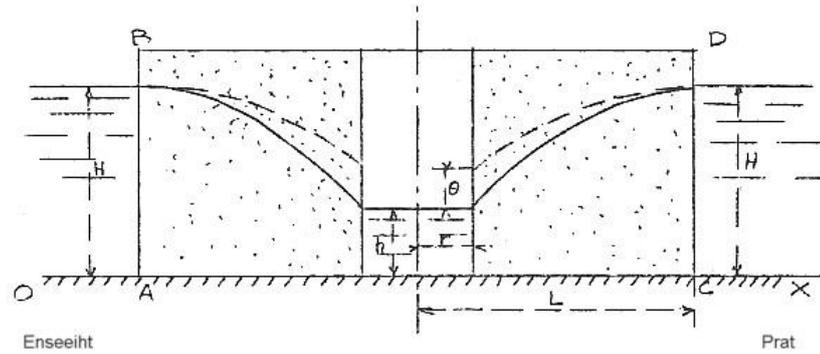
à la dénivellation maximale  $H - h$

à hauteur moyenne de l'eau  $\frac{H + h}{2}$

à la valeur du logarithme népérien du rayon du puits

et  
inversement  
proportionnelle

au logarithme du rayon  
L du massif  
cf. croquis ci-contre

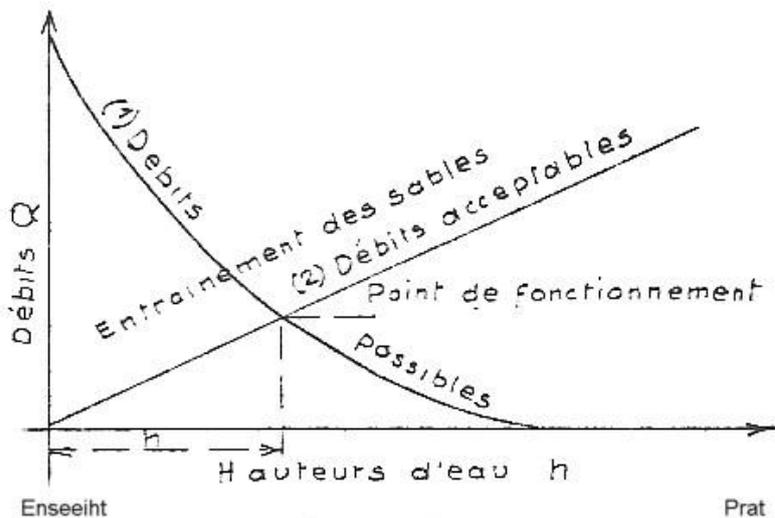


On

remarquera que le rayon du puits, n'intervenant que par son logarithme, ne présente pas une importance essentielle dans le calcul du débit. Par exemple si on double le rayon, le débit n'augmentera que de .... 18%

### 21. 3 point de fonctionnement d'un puits :

Le point de fonctionnement définissant la hauteur h dans le puits à observer



pour éviter les  
entraînements de sable et à  
laquelle correspond la  
pression maximale  
admissible de pompage,  
est donné par  
l'intersection de la courbe  
donnant les débits (1)  
possibles  
et de la droite  
donnant les débits (2)  
acceptables.

Cf. graphique ci-  
contre

Tout est poison, rien n'est poison  
Le poison c'est la dose  
Ambroise Paré

139

## 22 Qualités de l'eau potable :

D'après Le Strat, ci-devant chef du service des contrôles des eaux de la ville de Paris, une eau potable est "une eau qui plaît au consommateur et qui ne le rend pas malade". Ceci indique que l'eau doit être pure au point de vue bactériologique.

### 22.1 Qualités organo-leptiques :

#### 221. 1 Saveur :

L'eau n'étant pas chimiquement pure elle peut contenir des matières lui conférant un certain goût : salé, amer, métallique .... tolérable s'il reste agréable.

#### 221. 2 Odeur :

L'eau ne devrait pas présenter d'odeur ; cela dénote une pollution. Cependant, certaines eaux souterraines présentent une odeur sulfureuse qui disparaît d'ailleurs

<sup>139</sup> Ambroise Paré ( 1509 – 1590) célèbre médecin

rapidement. Parfois, après traitement, l'onnote une odeur de chlore résiduelle qui disparaît avec le temps.

## 22. 2 Qualités physiques :

### 222. 1 Couleur :

L'eau potable doit montrer une couleur bleutée sous une épaisseur supérieure à 2 mètres.

### 222. 2 Turbidité :

L'eau potable doit rester limpide et ne doit pas contenir des éléments la rendant trouble.

### 222. 3 Résistivité électrique :

Elle représente le reflet de la minéralisation d'une eau. Plus la résistivité est grande et plus la minéralisation est faible.

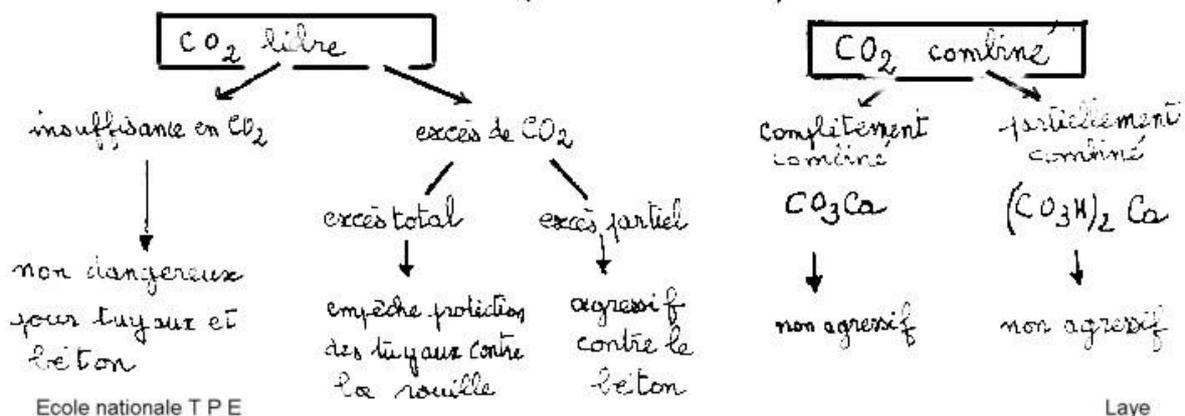
## 22. 3 Qualités chimiques<sup>140</sup> :

Une eau potable doit contenir sans excès, un certain nombre d'éléments minéraux édictait déjà la circulaire du 24 novembre 1954. Mais il faut se préoccuper de la conservation des ouvrages de distribution et s'assurer que l'agressivité de l'eau ne dépassera pas le seuil dangereux.

Hallopeau, ci-devant ingénieur en chef à la Compagnie générale des eaux (Véolia) le définissait ainsi :  
" ... une eau est agressive quand elle attaque les métaux ou les matériaux, conduisant à une corrosion intérieure des conduites ou ouvrages, à une tuberculation des conduites de fontes et à un entraînement des produits : eau rouilleuse ....La cause la plus générale en est la présence d'acide carbonique libre ou dissous ..."

### 223. 1 Equilibre calco-carbonique :

Dans une eau naturelle, l'on trouve une forme libre et une forme combinée de l'anhydride carbonique cf. schéma infra :



Il faut noter que l'attaque du béton ou du calcaire n'est pas le fait de tout le CO<sub>2</sub>, une partie est utilisée pour éteindre le carbonate et le transformer en bicarbonate et le maintenir en solution :

↑1 →



↓←2

Si la température augmente, sens 2, le carbonate précipite (dépôt dans les casseroles, l'eau est dite incrustante.

Si la température baisse, sens 1, l'eau refroidie est devenue agressive.

L'équilibre chimique dépendra de deux facteurs essentiels :  
le potentiel hydrogène p H et l'alcalinité

<sup>140</sup> Eau = O H<sub>2</sub> + minéraux + matières organiques (toxiques ou non). Les Européens demandent la qualité à la source et les américains la sécurité bactériologique à tout moment.

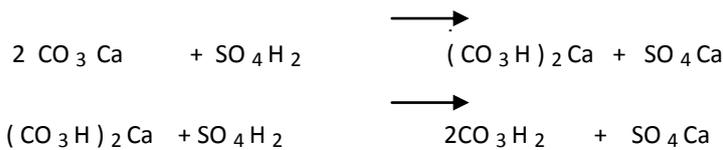
Le pH est représenté par le  $\log_{10} (H)^+$  si  $pH < 7$  l'eau est dite acide, si  $pH > 7$  elle est dite alcaline.

L'alcalinité indique la teneur en alcali  $(OH)^-$  en carbonates, bicarbonates alcalins alcalino-terreux de l'eau

• Représentation graphique de l'équilibre Dans toute eau  $CO_2$  et  $Ca^{++}$  sont présents sous les trois formes  $CO_3H_2$   $CO_3H^-$   $CO_3^{--}$

La maîtrise de cet équilibre évitera une eau agressive ou une eau incrustante. En raison de son importance il est devenu indispensable de représenter graphiquement ce qui arrive si un des facteurs se trouve modifié.

Pour ce faire Hallopeau utilisa le titre alcalimétrique complet ou TAC, lequel mesure à  $pH = 4,5$  : la teneur en alcali  $(OH)^-$ , la teneur en carbonates  $(CO_3)^{-}$ , la teneur en bicarbonates  $(CO_3H)^{-}$  lorsque tout a été neutralisé par l'acide à  $pH$  de 4,5



$$TAC = 2(CO_3)^{-} + (CO_3 H)^{-} + (OH)^{-}$$

Hallopeau utilisait ensuite les équations d'action de masse du type  $(H)^+ (OH)^- = K_e$  (constante de dissociation) pour arriver à la première équation de l'alcalinité

$$\log_{10} Alc = \log_{10} K + \log_{10} CO_3 H_2 + pH$$

Donc à  $CO_2$  libre constant les courbes seront des droites d'ordonnée le  $pH$  et d'abscisse l'alcalinité, cette dernière étant mesurée en  $mg$  de  $OCa$  /litre ou en  $mg$  de  $CO_3 Ca$  /litre sachant que  $28 mg/l$   $OCa$  correspond à  $50 mg/l$  de  $CO_3 Ca$

Puis il est arrivé à la seconde équation donnant la saturation en  $CO_3 Ca$  :

$$pH_{saturation} = C - 2 \log_{10} Alc + m \quad C = \text{constante à température donnée}$$

L'on va se trouver en face d'une famille de droites à coefficient angulaire négatif recoupant les précédentes.

Une eau dont le  $pH = 7$  peut être agressive si son alcalinité donne un point en deçà de la droite de saturation. par exemple  $28$  en  $OCa$  / litre ou  $50$  en  $CO_3 Ca$  /litre

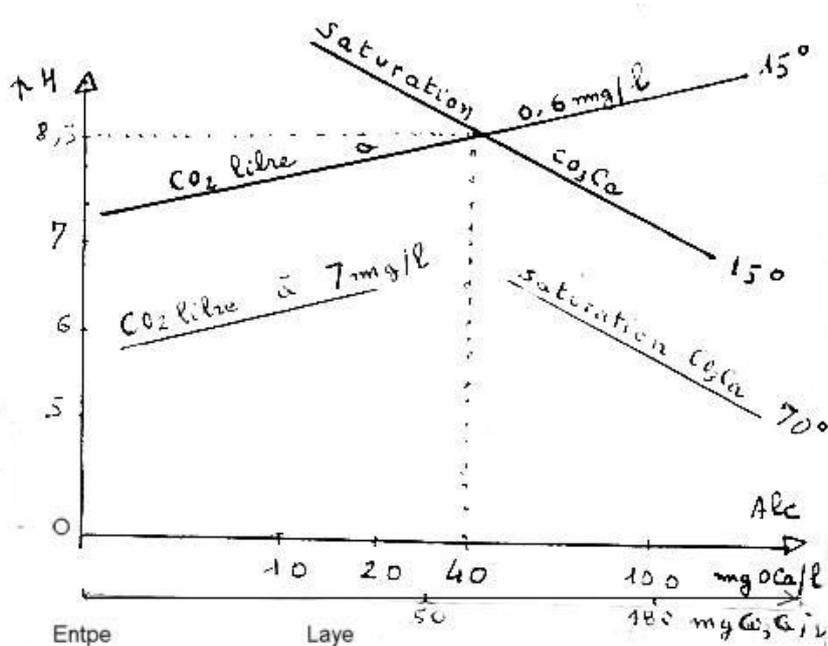
Une eau équilibrée à  $15^\circ$  par exemple  $pH = 8,5$  et alcalinité =  $40$  en  $OCa$  /litre ou  $70$  en  $CO_3 Ca$  /litre devient incrustante à  $70^\circ$  Il faudra souvent corriger :

- l'eau agressive par aération, départ de  $CO_2$

ou passage sur filtre à marbre,

pour obtenir du  $CO_3 Ca$  qui précipitera entraînant une baisse de l'alcalinité ainsi qu'une augmentation du  $pH$ .

- l'eau incrustante par échange d'ions  $Ca^{++}$  est fixé et  $Na^+$  est libéré ou traitement à la chaux ce qui amène un précipité de  $CO_3 Ca$  induisant une augmentation du  $pH$  et une baisse de l'alcalinité.



## 2

### 3 Technologie et exploitation des ouvrages

#### 31 Eaux atmosphériques :

On les récupère surtout dans les régions particulièrement pauvres des eaux de surface et en eaux souterraines et on les conserve dans des citernes.

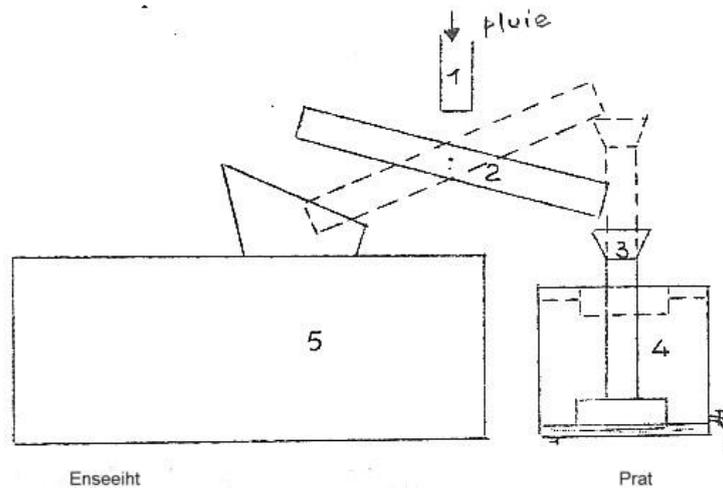
##### 31.1 Recueil des eaux de pluies :

Il faut éliminer les eaux du début de la pluie car elles entraînent des poussières rencontrées lors du parcours.

L'appareil Munier, utilisé notamment aux Baléares, assure cette élimination.

L'eau de pluie 1 est reçue sur une bâche oscillante 2 qui la dirige soit vers le réservoir auxiliaire 4 soit vers la citerne 5.

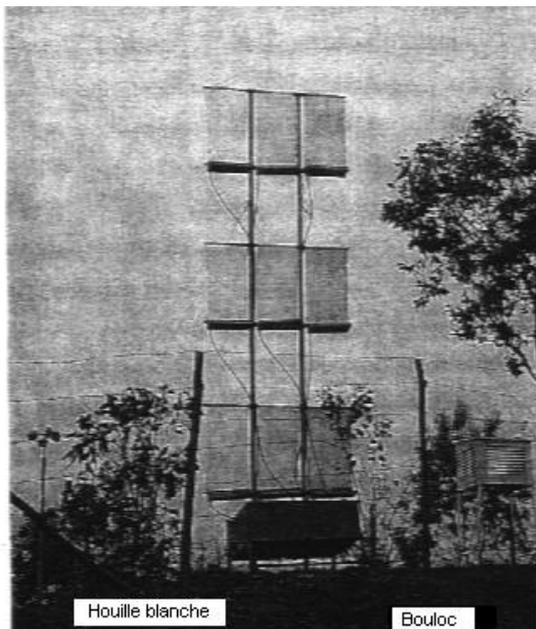
Le réservoir auxiliaire est muni d'un robinet goutte à goutte et contient un tuyau vertical 3 doté à sa base d'un flotteur.



Ce dernier remontera au bout d'un moment, repoussera la bâche qui déversera l'eau selon un parcours préalablement lavé vers la citerne.

##### 31.2 Recueil de l'eau des brouillards :

Au Pérou, au Chili, aux îles du Cap Vert, à l'instar des toiles d'araignées qui se couvrent de gouttelettes d'eau par temps de brouillard, on a imaginé d'installer de filets à maille plastique sur les sommets en bord de mer noyés parfois dans les brouillards.



Les gouttes recueillies s'écoulent dans une goutte placée sous les filets et l'eau recueillie est conduite vers les villages utilisateurs.

cf. photographie ci-contre

Le rendement de ces installations peut atteindre des chiffres non négligeables de l'ordre de ... 4 litres d'eau potable par m<sup>2</sup> de filet et par jour.

## 32 Eaux superficielles :

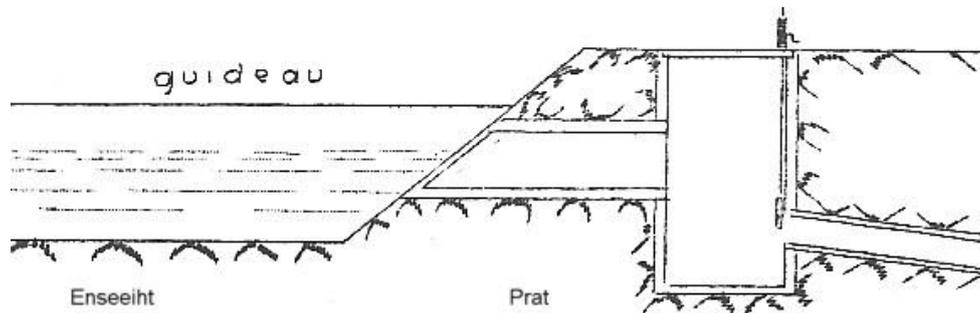
Ce sont les plus abondantes et les plus faciles à prélever qu'il s'agisse d'eaux de rivières ou de lacs.

### 32.1 Prises en rivières :

Elles doivent être aménagées en amont des agglomérations. Le choix de l'emplacement de la prise devra être précédé d'analyses chimiques et bactériologiques avec examen de la faune et de la flore aquatique.

#### 321. 1 Dérivation en rivière non navigable :

Une canalisation, dont l'entrée est protégée par une grille, est placée perpendiculairement à la berge. Elle aboutit à une chambre servant à régulariser et à jauger le débit.

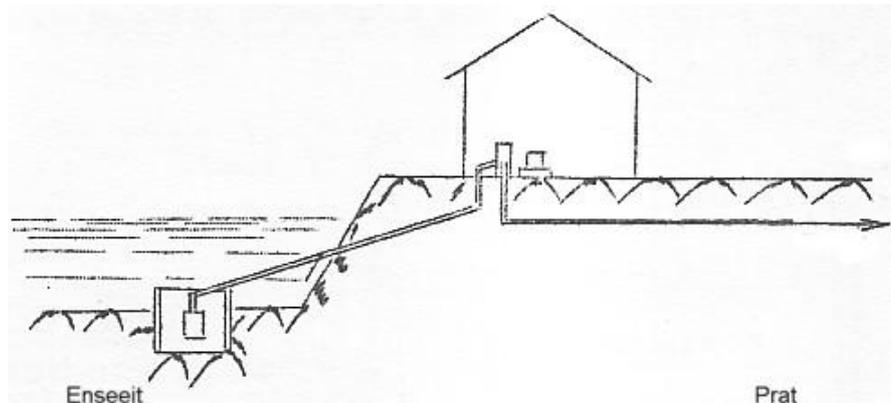


Le départ de la chambre à alimenter est située au-dessus du radier de cette chambre qui sert ainsi de cale pour le dépôt des matières décantables. Le guideau est un barrage partiel formant retenue.

#### 321. 2 Prélèvement par pompage en rivière non navigable :

Si le prélèvement est effectué par pompage, le puisard peut être aménagé dans le plafond du cours d'eau, en rivière non navigable.

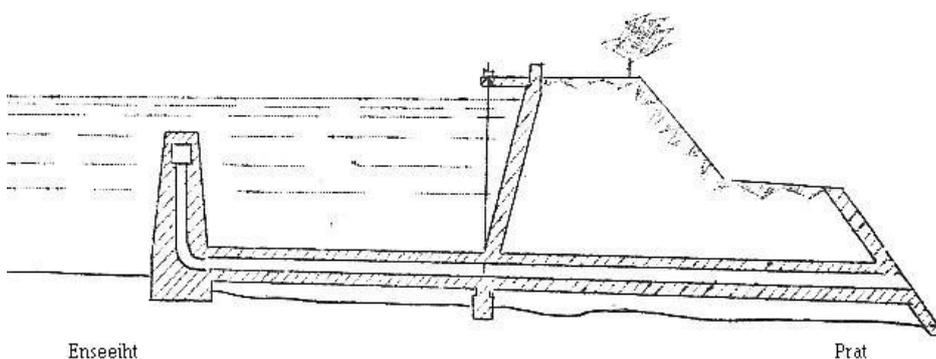
cf. croquis ci-contre



Si la rivière est navigable le puisard doit être aménagé dans la berge

#### 321. 3 Prise dans les lacs :

Si le lac est profond il y a intérêt à effectuer le prélèvement en eaux moyennes car, suivant leur densité, les impuretés précipitent au fond ou flottent en surface.



Ceci nécessite l'installation de tours dont les caractéristiques sont fonction de leur hauteur. cf. croquis ci-contre du lac de St Ferréol, créé pour alimenter le canal du Midi.

### 33 Eaux souterraines :

Lorsque les volumes à fournir correspondent à de faible ou moyenne importance, il vaut mieux, chaque fois qu'on le peut, exploiter les eaux souterraines qui sont généralement pures.

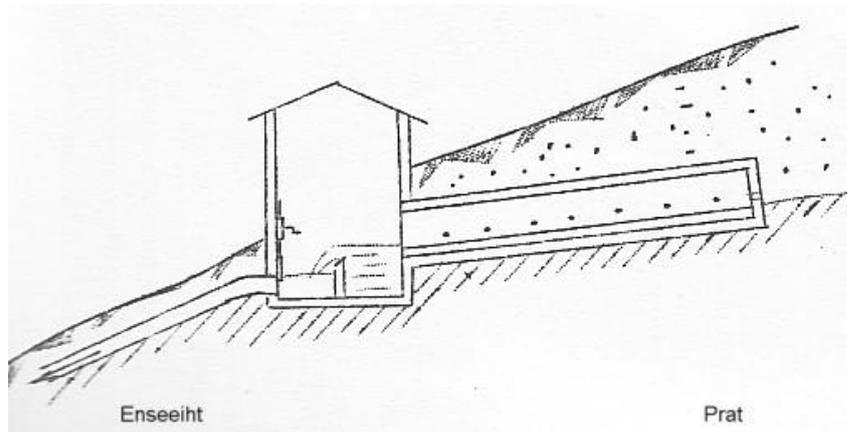
#### 33.1 Captage des sources :

##### 331. 1 Sources de déversement :

La méthode la plus simple consiste à poser un drain ou à construire une galerie drainante au niveau de la couche imperméable.

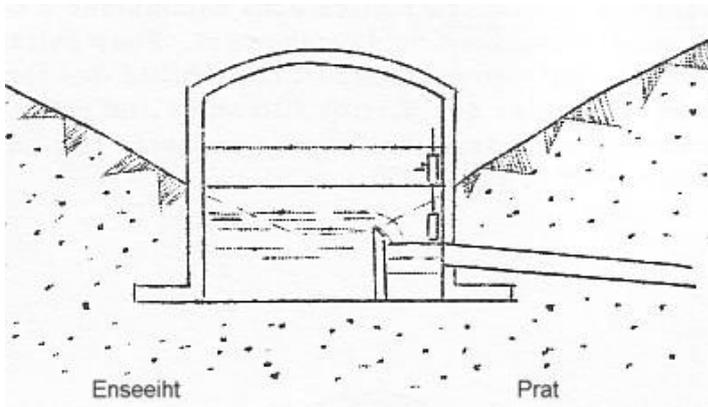
La canalisation de captage débouche dans une chambre comprenant un déversoir pour le jaugeage du débit et le départ de la conduite d'amenée.

cf. croquis ci-contre



##### 331. 2 Sources d'émergence :

Le captage d'une source d'émergence ou de talweg nécessite le dégagement des griffons jusqu'à la nappe.



On les entoure d'une maçonnerie étanche qui, coiffée d'une couverture, constitue une chambre dans laquelle se trouvent le déversoir de jaugeage et le départ de la conduite d'amenée

cf. croquis ci-contre

Le départ de cette dernière sera placée au-dessus du radier de la chambre de façon à créer une cale de décantation dans laquelle se déposeront les sables provenant de la couche aquifère.

#### 33. 2 Prises d'eau dans les nappes souterraines à faible profondeur :

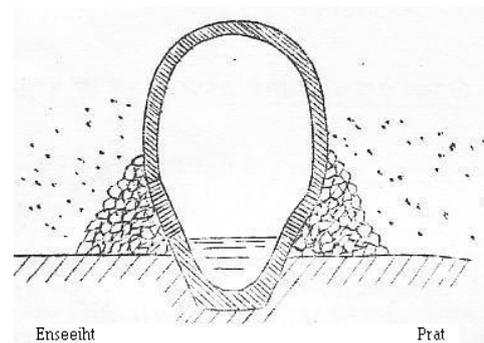
Le captage s'effectue soit par des galeries drainantes soit par des puits

##### 332.1 Galerie drainante :

Elles s'avèrent semblables à celles servant à recueillir les eaux de sources de déversement.

Dans le dessein d'éviter l'entraînement des éléments fins, ce qui compromettrait la stabilité des terrains voisins et amènerait un colmatage des parties filtrantes, on place entre celles-ci et le terrain naturel des massifs drainants constitués par des pierres de granulométrie convenable

cf. croquis ci-contre

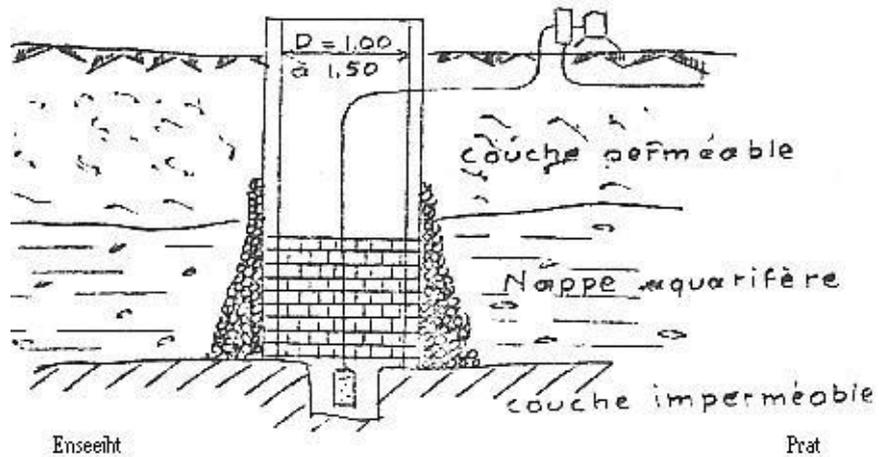


### 332. 2 Puits classique :

il présente généralement la forme d'un cylindre dont la base inférieure est ancrée dans le terrain imperméable supportant la nappe et la base supérieure est en légère saillie sur le sol. L'élément actif du puits est la partie drainante, aménagée au niveau inférieure de la nappe aquifère.

Si l'eau provient d'une fissure dans le sol rocheux, la paroi du puits reste simplement ouverte au droit de la fissure.

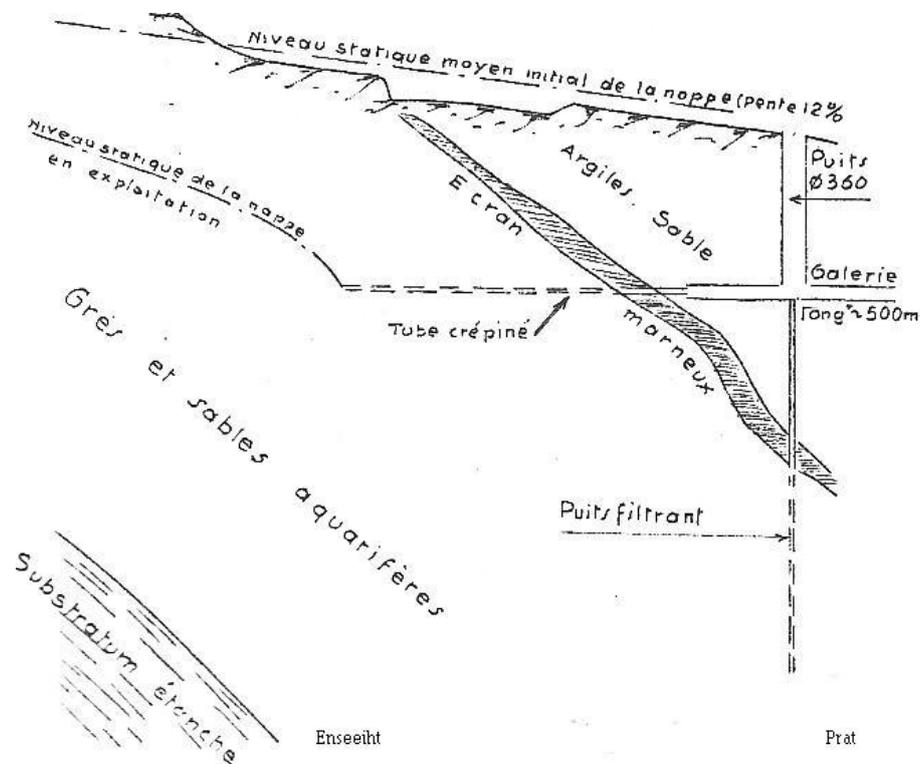
Par contre, si l'on se trouve dans les alluvions, la partie active sera constituée de manière à n'absorber que l'eau sans provoquer l'entraînement des sables.



### 332. 3 Puits à drains horizontaux rayonnant :

L'efficacité de la partie active du puits peut être augmenté par des drains horizontaux posés dans la couche aquifère et débouchant dans le puits.

Ceci se pratique lorsque la profondeur du gisement aquifère devient telle que chaque puits classique nécessite un équipement individuel de relèvement et si le débit cherché est très important.



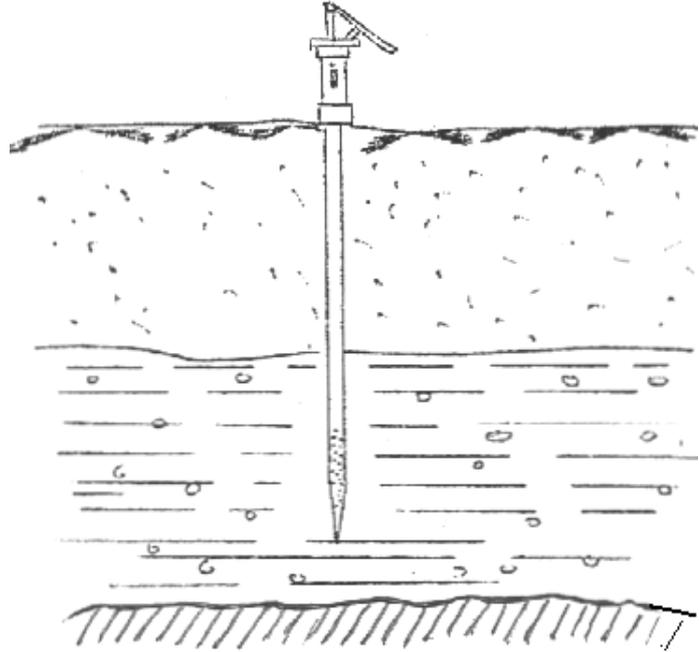
Le drain horizontal permet parfois de faire l'économie d'une galerie comme dans le cas de l'alimentation d'Orléansville (Algérie) captage horizontal du Medjadjas échelle / 1000.

cf. coupe schématique supra

### 332. 4 Puits instantanés :

Lorsque les besoins sont faibles et la nappe peu profonde, la solution la plus simple consiste à forer des puits instantanés.

Chacun étant constitué par un tube d'acier de 30 à 80 mm de diamètre dont la base perforée est plongée dans la zone aquifère et dont le sommet est équipée d'une pompe

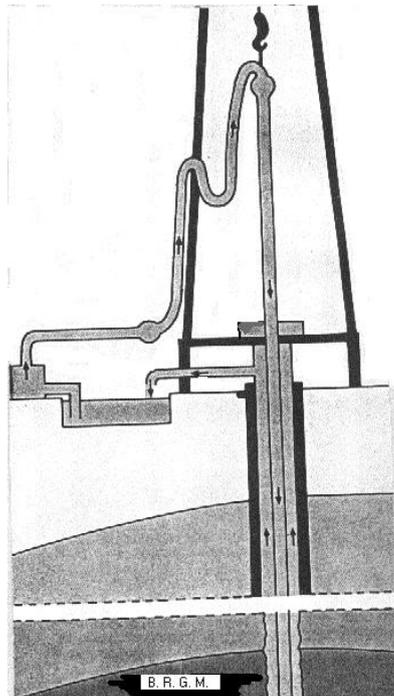


cf. croquis ci-contre

Il s'agit du procédé inventé par l'américain Norton où le cuvelage métallique du puits est constitué par le tube même qui a servi de forage et que l'on enfonce dans le sol par une chèvre pendue à une poulie par exemple.

### 33. 3 prises d'eau dans les nappes souterraines à grande profondeur :

Les difficultés d'exécutions ne permettant pas de construire des puits d'une profondeur dépassant 80 m au-delà, on procède par forages tubés, à forme télescopique, dont le diamètre décroissant varie de 100 cm à 10 cm.



Il s'agit du procédé inventé par Fauvelle en 1845 utilisant une tige creuse dans laquelle on injecte une boue à bentonite<sup>141</sup> de pression correspondant à celle du sol traversé, dans le dessein d'éviter l'entraînement d'éléments fins pouvant compromettre la stabilité du massif. Cette boue ramène en surface les débris du sondage.

cf. croquis ci-contre

La corrosion des éléments métalliques par le gaz carbonique libéré à la suite de la chute de pression au droit de la paroi filtrante impose des métaux inoxydables.

Les conduites montantes des pompes de forage peuvent atteindre une longueur de 180 m.

<sup>141</sup> boue argileuse de viscosité calculée, avec le nombre de Reynolds  $R$

## 4 Protection des ressources

### 41 Vulnérabilité :

#### 41.1 Menace des eaux polluées :

D'origine domestique (matières fécales) ou animale (dépôts stercoraires) ou agricole (engrais et pesticides) ou industriels (métaux et produits toxiques).

D'origine naturel par le biais des inondations véhiculant la pollution supra et en sus des matières solides en suspension.

#### 41.2 Menace d'action malveillante :

Cela va du simple vandalisme au fait de guerre, la destruction des réservoirs d'eau de Singapour par les japonais a entraîné la capitulation des anglais en 1941. La destruction du barrage de la Ruhr par l'aviation anglaise en 1943 a lourdement handicapé l'Allemagne dans son effort de guerre.

### 42 Périmètres de protection :

#### 42.1 Législation :

L'article L 20 du Code de santé publique stipule :

“ En vue d'assurer la protection de la qualité des eaux, l'acte portant déclaration d'utilité publique des travaux de prélèvement d'eau destinée à l'alimentation des collectivités humaines détermine autour du point de prélèvement un périmètre de protection immédiate dont les terrains sont à acquérir en pleine propriété, un périmètre de protection rapprochée à l'intérieur duquel peuvent être interdits ou réglementés toutes activités et tous dépôts ou installations de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux et, le cas échéant, un périmètre de protection éloigné à l'intérieur duquel peuvent être réglementer les activités, installations et dépôts ci-dessus visés .... ”

#### 42.2 Procédure d'application :

Elle se réalise en quatre étapes :

- La municipalité possède l'initiative de la démarche
- L'un des hydro-géologues agréés du département intervient ensuite,
- La direction départementale de l'Agriculture établit le dossier de déclaration d'utilité publique,
- Les mesures de protection sont applicables sur le terrain.

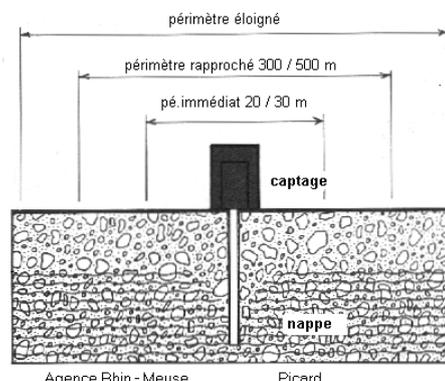
#### 42.3 Résultat :

Le périmètre immédiat sera souvent de dimension faible, quelques ares parfois, et sera enclos et soigneusement entretenu.

Le périmètre rapproché sera d'autant plus étendu que la circulation de l'eau captée est rapide.

Enfin le périmètre éloigné de dimensions variables nécessitera une surveillance des activités qui s'y déroulent ou pouvant s'y créer.

cf . croquis ci-contre



### 43 Autres mesures :

Pour empêcher l'arrivée d'eau polluée on utilisera des masques en matériaux imperméables : béton, argile. Pour évacuer rapidement les eaux de ruissellement sujettes à pollution on bétonnera les fossés collectant les eaux pluviales en bordure d'une chaussée bituminée.

Les parties accessibles aux visiteurs seront limitées (cf. plan vigie pirate anti - terrorisme). Il faut prévoir un dispositif de fermeture d'arrivée des eaux captées et de vidange du cuvelage habituellement noyé.

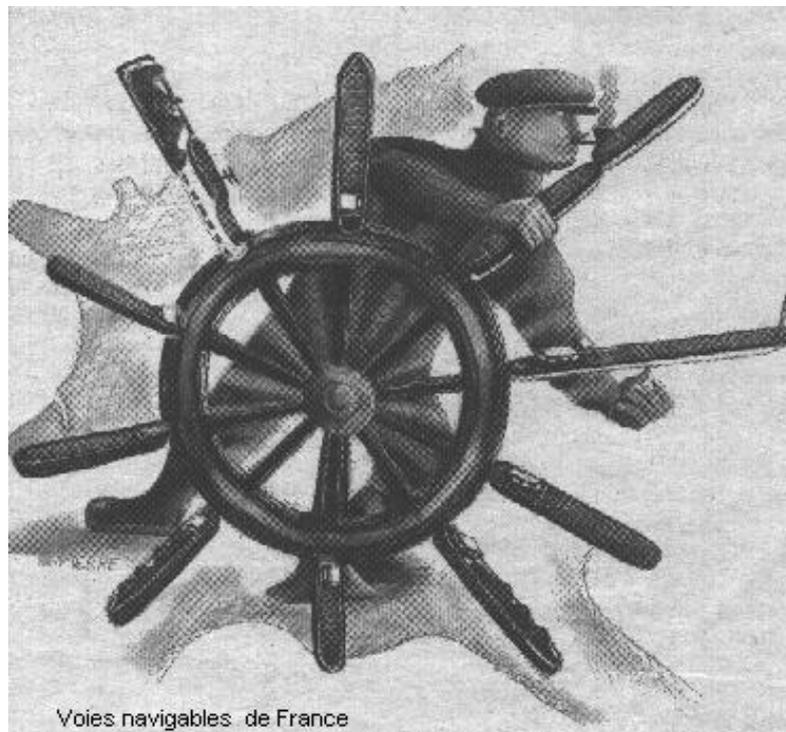
## Addendum n°2

---

# Lexique bilingue illustré d'hydrologie hyétologie, potamologie, hydrogéologie

---

## Zweisprachiges illustriertes Wörterbuch der Hydrologie Regenkunde, Flusskunde, Grundwasserkunde



# Prologue

## 1 Constat

Les étudiants arrivant notamment en BTS gestion de l'eau ou en BTS gestion protection de la nature se trouvent confrontés à une discipline nouvelle, donc à une terminologie nouvelle quand ils abordent l'hydrologie, la potamologie et l'hydrogéologie. Terminologie d'autant plus délicate qu'elle fait souvent appel à des mots tirés des langues anciennes que les étudiants, sauf exception, ne connaissent plus aujourd'hui.

De plus il s'agit de sciences non exactes et les termes usités apparaissent parfois comme non définis exactement, il arrive même que pour un phénomène donné, on emploie parfois deux termes.

## 2 Définitions

**L'hydrologie** terme générique décrit et explique : les processus qui régissent le cycle de l'eau dans l'atmosphère et la croûte terrestre .

Elle se subdivise en un certain nombre de disciplines parmi lesquelles nous en considérerons trois :

- **L'hyétologie**<sup>142</sup> au sein de l'hydrologie traite :

des précipitations atmosphériques et de leurs mesures

- **La potamologie**<sup>143</sup> au sein de l'hydrologie s'intéresse à :

- l'étude des régimes fluviaux : débit moyen ou module, crue, étiage,
- l'étude des courants fluviaux : formules d'hydraulique à surface libre, jaugeages des débits, vitesses, turbulence, force tractrice du courant, érosion, transport des matières solides.
- l'étude des lits fluviaux : profils en travers, profils en long, méandres, sédimentation, bancs, divagation des lits, action des courants sur ces derniers et les influences réciproques.

- **L'hydrogéologie** au sein de l'hydrologie est considérée ici :

comme l'étude de l'écoulement de l'eau dans des milieux souterrains : qu'ils soient " perméables en grand " par exemple les milieux fracturés tels que les calcaires, ou "perméables en petit " par exemple les milieux poreux tels que les sables.

## 3 Sources utilisées

L'attention du lecteur est attirée sur le fait que les 114 mots du présent ouvrage tiennent leur définition du glossaire de l'organisation météorologique mondiale (édition de '92). Ledit glossaire publié en anglais, français, espagnol, russe et chinois, a atteint une notoriété mondiale aujourd'hui.

D'autres définitions ont été obtenues par le truchement du glossaire de " l'environnement au Canada " de 1991

## 4 Traduction

A l'heure européenne, il est apparu opportun de conférer audit lexique un **caractère bilingue** en adjoignant à chaque terme sa traduction en allemand.

Le soin de la traduction a été confié à Monsieur Erwin Hampp, d'Offenbourg, ingénieur honoraire du service allemand des Ponts et Chaussées. Qu'il trouve ici l'expression de nos remerciements pour son action compétente et efficace.

## Vorwort

---

<sup>142</sup> u grec, ο νετός : la précipitation atmosphérique

<sup>143</sup> du grec ο ποταμός : le fleuve

*Dieses Wörterbuch wendet sich an Studenten des Studienganges der Hydrologie, Potamologie (Flusskunde) und Hydrogeologie. Die französischen Definitionen sind international anerkannt. Man findet sie im "Fachwörterbuch Verzeichnis der Weltorganisation für Meteorologie" von 1992 und im "Fachwörterbuch für die Kanada Umwelt" von 1991 des WasserQuebecverbands*

## Lexique bilingue illustré d'hydrologie, de potamologie et d'hydrogéologie



### A

**affluent (tributaire)**(nom masc.) : *Nebenfluss (der)* cours d'eau qui se jette dans un cours d'eau plus grand ou un lac.

**acidité de l'eau** (nom fém.): *Acidität(die)* quantité en milliéquivalent / litre d'eau de base forte qui doit être utilisée pour neutraliser les acides forts contenus dans l'échantillon ramené ainsi à un pH = 7.

**alcalinité de l'eau** (nom fém.) : *Alkalität (die)* quantité de cations équilibrés par des acides faibles en milliéquivalents d'ions H<sup>+</sup> neutralisés pour 1 litre d'eau.

**amont** (adjectif.) : *oberstrom* direction tournée vers la source d'un cours d'eau.

**anthropique** (adjectif) : *anthropogen* qui résulte de l'action de l'être humain.

**aquifère (horizon)** (nom masc.) : *wasserführende Schicht(die)* formation perméable contenant de l'eau en quantité exploitable.

**aride** (adjectif): *dürr* caractéristiques d'un climat dans lequel les précipitations sont insuffisantes pour assurer le maintien de la végétation.

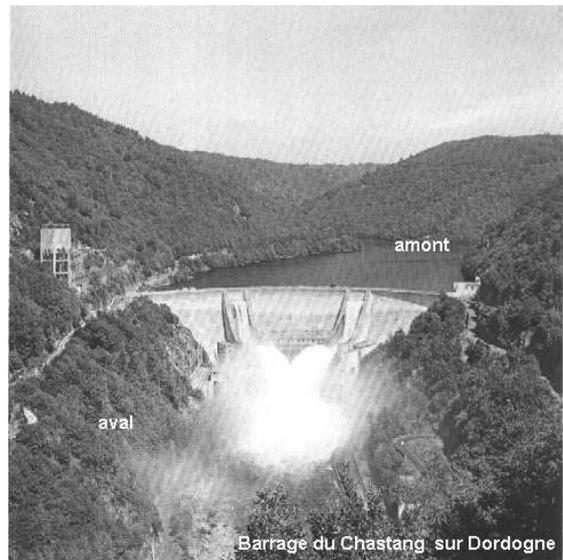
**atterrissements** (nom masc.): *Anlandungen (die)* processus d'accumulations de matériaux transportés par l'eau.

**aval** (adjectif.) : *unterstrom* situé après, dans le sens du courant.

**aven (bétoire)** (nom masc.) : *Hohlraum (der)* orifice naturel creusé par les eaux en région calcaire.

### B

**barrage**(nom masc.) : *Staudamm (der)*, *Talsperre (die)* ouvrage muni de vannes construit en travers du lit d'une rivière pour régler le niveau d'eau amont, régulariser l'écoulement ou dériver l'eau vers un canal.



**bassin-versant (bassin hydrographique)** (nom masc.) : *Einzugsgebiet (das)* ensemble d'une région ayant un exutoire commun pour ses écoulements de surface.

**atardeau** (nom masc.) : *Fangedamm (der)* barrage provisoire pour travaux.

**benthique** (adj.) : *benthisch* zone correspondant au fond d'une étendue d'eau.

**berge** (nom fém.) : *Uferböschung (die)* partie de terrain bordant un cours d'eau

**Bernoulli**<sup>144</sup> (**théorème de**) : *Bernoullische Gleichung (die)* théorème fondamental de la mécanique des fluides relatif à l'énergie .

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + \xi = \text{constante sur une même trajectoire de veine fluide}$$



$z$  : énergie de position ,  $\frac{p}{\rho g}$  : énergie de pression,

$\frac{u^2}{2g}$  : énergie cinétique,  $\xi$  : perte de charge

**bief d'amenée** (nom masc.) : *Zulaufkanal (der)* chenal qui conduit l'eau vers une roue à eau ou une turbine.

C

**canal de dérivation** (nom masc.) : *Entlastungskanal (der)* canal construit pour dériver l'écoulement d'un point amont en un point aval.

**canal de jaugeage** (nom masc.) : *Messkanal (der)* tronçon de canal découvert aménagé dans un chenal pour imposer un écoulement stable en vue de mesurer le débit et établir la relation hauteur/débit.

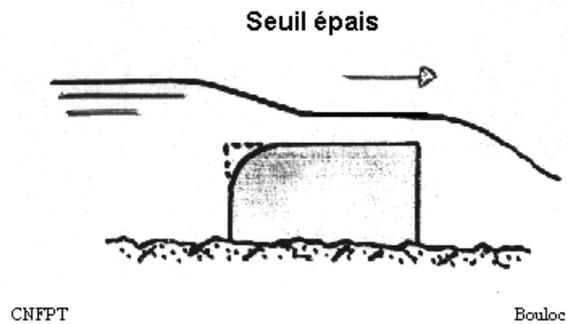
**captage** (nom masc.) : *Fassung (die)* dérivation des eaux d'une source dans des conduites ou des canaux.

**charriage** (nom masc.) : *Geschieführung (die)* entraînement par le courant de matériaux sur le fond du lit d'un cours d'eau.

**chaussée** (nom fém.) : *Sohlschwelle (die)* seuil épais artificiel ou naturel dans le lit d'une rivière.

---

<sup>144</sup> Daniel Bernoulli (1700 – 1782) Suisse, issu d'une grande famille d'érudits, il a été un des premiers à décrire les déformations des solides et les écoulements des fluides. Il s'est imposé aussi en médecine et en philosophie.



**chemin de halage** (nom masc.) : *Treidelpfad (der)* chemin suivant la rive d'une rivière d'où les bateaux étaient halés.

**chenal** (nom masc.) *Gerinne (das)* partie la plus profonde du lit d'une rivière où passe le courant principal.

**Chézy (de) formule de** : *Chezysche Formel (die)* Elle donne la vitesse dans un cours d'eau ou un canal à écoulement permanent libre :

$$u = C \sqrt{R i}$$

u : vitesse, R : rayon hydraulique, i : pente de la rivière, C : coefficient de Manning lequel a trouvé l'équation donnant C :

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad n : \text{coefficient de}$$

rugosité

n

**condensation** (nom fém.) : *Kondensation (die)* passage de la phase vapeur à la phase liquide.

**Coriolis (force de)** : *Corioliskraft (die)* force par laquelle un corps en mouvement à la surface d'une sphère tournant sur elle-même est déporté à droite dans le nord (mouvement dextrogire) et à gauche dans le sud (mouvement lévogyre).

**cours d'eau (rivière, fleuve)** (nom masc.) : *Wasserlauf (der)* chenal naturel ou artificiel par lequel l'eau peut s'écouler.

**crue** (nom fém.) : *Hochwasser (das)* montée du niveau d'un cours d'eau jusqu'à un maximum dont il redescend plus lentement

**crue de projet (critique ou nominale)** (nom fém.) : *Entwurfshochwasser (das) Bemessungshochwasser (das)* débit maximum instantané adopté pour la conception d'un ouvrage hydraulique ou de travaux de régularisation en fonction de l'hydrologie et des financements.

**cycle** (nom masc.) : *Zyklus (der)* succession des phases par lesquelles l'eau passe de l'atmosphère à la terre et retourne à l'atmosphère.

## D

**Darcy (loi empirique de) :** *empirisches Gesetz von Darcy (das)* l'écoulement d'un fluide dans un corps poreux s'effectue de façon telle que sa vitesse d'écoulement est

→ →  
proportionnelle à la force transversale de pénétration égale à la valeur négative du gradient du potentiel hydraulique

$$u = - K \text{ grad } h$$

u : vitesse d'écoulement, K: coefficient de perméabilité,

h : potentiel hydraulique (la charge baissant dans le sens de l'écoulement pour que la vitesse reste positive, on met le signe moins)



alcarazas en terre poreuse

**débit** (nom masc.): *Abflussmenge (die)* volume d'eau traversant une section transversale d'un cours d'eau par unité de temps.

**débit de pointe** (nom masc.): *Spitzenabfluss (der)* débit maximum instantané d'un hydrogramme donné.

**déversement (ruissellement, écoulement)** (nom masc.): *Überlaufen (das)* excédent d'eau se déversant en trop-plein.

**déversoir** (nom masc.): *Überlaufwehr (das)* dispositif par lequel l'eau s'écoule. On l'utilise soit pour régler le niveau de l'eau en amont, soit pour mesurer le débit

**digue** (nom fém.): *Damm (der)* remblai construit pour contenir les eaux d'une rivière dans un secteur déterminé.

**Dupuit (approximation de) :** *Näherungsformel von Dupuit (die)* dans un écoulement souterrain permanent, il est admis que les lignes de courant sont horizontales, que les isopièzes (équipotentiellles) sont verticales et que le gradient hydraulique  $\frac{\Delta h}{\Delta l} = (\text{grad } h)$  constant le long de la verticale est égal à la pente de la surface de la

$\Delta l$   
nappe dans un aquifère libre.

## E

**eau d'égouts domestiques** (nom fém.) : *häusliches Abwasser (das)* eau de consommation d'une collectivité rejetée après avoir été souillée par différents usages (urbains, domestiques, industriels) parfois mélangée à de l'eau souterraine ou pluviale.

**eau résiduaire industrielle** (nom fém.) : *Industrieabwasser (das)* eau contenant des déchets de matières solides ou liquides rejetées après usage industriel comme inutilisables.

**eaux superficielles** (nom fém.) : *Oberflächenwasser (das)* toutes les eaux qui s'écoulent ou stagnent à la surface terrestre.

**eau usée** (nom fém.) : *Abwasser (das)* eau de consommation d'une collectivité rejetée après avoir été souillée par des usages domestiques

**écoulement** (nom masc.) : *Abfluss (der)* partie des précipitations qui apparaît sous forme d'écoulement dans un cours d'eau.

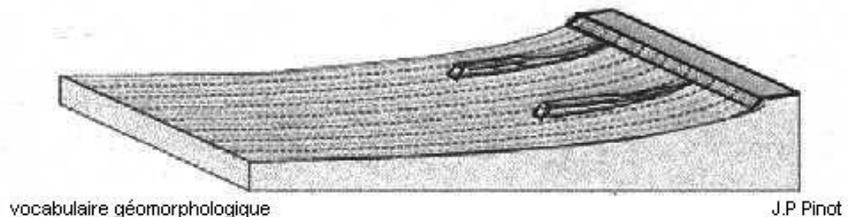
**effluent d'eau traitée** (nom masc.) : *Klärwasser (das)* eau s'écoulant d'une station d'épuration.

**embâcle** (nom masc.) : *Eistau (der)* amoncellement local de glace qui, dans un cours d'eau, fait obstacle à l'écoulement.

**émissaire** (nom masc.) : *Vorfluter (der)* cours d'eau évacuant le drainage de toute une région

**épi** (nom masc.) : *Buhne (die)* ouvrage construit à partir de la berge d'une rivière

dans une direction transversale par rapport au courant.



**épuration** (nom fém.) : *Aufbereitung (die)* traitement des eaux naturelles ou des eaux d'égout, destiné à modifier les caractéristiques physiques et à éliminer les substances chimiques et les organismes vivants indésirables.

**équilibre calco-carbonique** (nom masc.) : *Kalzium-Karbonatgleichgewicht (das)* dans une eau naturelle il existe un équilibre entre les formes libre et combinée de l'anhydride carbonique :

←↑



↓

**érosion** (nom fém.) *Erosion (die)* arrachement et transport d'éléments de sol par l'eau courante, les glaciers, les vents et les vagues.

**estuaire** (nom masc.) : *Mündungsbereich (der)* portion d'un cours d'eau généralement large, proche de la mer.

**étang** (nom masc.) : *Teich (der) Weiher (der)* réservoir d'eau de petites dimensions.

## F

**Fargue (lois empiriques de) :** *empirische Gesetze von Fargue (die)* Elles permettent de connaître les méandres, les hauts-fonds (seuil banc) et bas-fonds.

- loi de l'écart : le seuil (banc) se situe  $\frac{1}{4}$  en amont de l'inflexion de la courbure, la mouille (creux) est reportée à  $\frac{1}{4}$  en aval de l'inflexion de la courbure,
- loi de la mouille : la mouille (bas-fond) est d'autant plus profonde que la courbure au sommet est plus prononcée.
- loi du développement : la longueur d'un méandre stable correspond à environ 8 fois la largeur du cours d'eau.



**frasil (sorbet)** (nom masc.) : *Eispailletten (die)* fines aiguilles, lamelles ou paillettes de glace suspendues dans l'eau. Dans les cours d'eaux et les lacs les cristaux se forment dans de l'eau surfondue très agitée.

**Froude (nombre de) :** *Froudesche Zahl (die)* nombre sans dimension indiquant l'influence de la pesanteur (force de gravité) sur le mouvement d'un fluide :

$$F = \frac{u}{\sqrt{gR}}$$

$$\sqrt{gR}$$

u : vitesse de l'écoulement,  $\sqrt{gR}$  : célérité des ondes de gravité, R : rayon hydraulique.

## G

**gaz carbonique** (nom masc.) : *Kohlendioxid (das)* gaz résultant de la combinaison de l'oxygène et du carbone, CO<sub>2</sub> est obtenu par la respiration des plantes et des animaux.

**granulométrie du sol** (nom fém.) : *Bodentextur (die)* mesure de la taille des grains d'un sédiment.

## H

**hydrogramme** (nom masc.) : *Abflussganglinie (die)* expression ou représentation graphique ou non de la variation des débits en fonction du temps.

**hydrographie** (nom fém.) : *Gewässerkunde (die)* science qui traite de la description et des mesurages relatifs à toutes les étendues d'eau, en particulier la cartographie des étendues d'eau pour les besoins de la navigation.

**hydrolyse** (nom fém.) : *Hydrolyse (die)* réaction chimique de l'eau sur une substance se traduisant par la rupture d'une liaison ; il s'agit de la réaction inverse de la formation d'un sel.

**hyétoqramme** ( nom masc.) : *Niederschlagsganglinie (die)* distribution dans le temps de l'intensité d'une averse.

**hygromètre** (nom masc.) : *Hygrometer (das)* instrument mesurant l'humidité relative de l'atmosphère et permettant de déterminer le point de rosée.

## I

**infiltration** (nom fém.) : *Infiltration (die)* mouvement de l'eau pénétrant dans un milieu poreux depuis la surface du sol.

**inondation** (nom fém.) : *Überschwemmung (die)* submersion par l'eau débordant du lit normal d'un cours d'eau.

**isotherme** (nom masc.) : *Isotherme (die)* ligne ou surface passant par des points d'égale température

**isohypse (de la nappe libre)** (nom fém.) : *Grundwasserhöhenlinie (die)* ligne reliant tous les points où la surface de la nappe libre est à la même hauteur par rapport à un plan de référence, en général le sol.

**isopièze (de la nappe captive)** (nom fém.) : *Linie gleichen Drucks (die)* ligne ou surface passant par des points d'égale pression .

## J

**jaugeage** (nom masc.) : *Eichung (die)* ensemble des opérations ayant pour but de déterminer le débit d'un cours d'eau pour une hauteur donnée à l'échelle.

**jökulhlaup** (nom masc.) : *Jökulhlaup (das)* très forte crue due à l'évacuation des eaux d'un lac retenues par un glacier.

## K

**karst**(nom masc.) : *Karst (der)*

région de calcaire et dolomite présentant une topographie souterraine particulière due à la dissolution de certaines parties du sol et du sous-sol et du cheminement de l'eau dans les galeries naturelles ainsi formées.

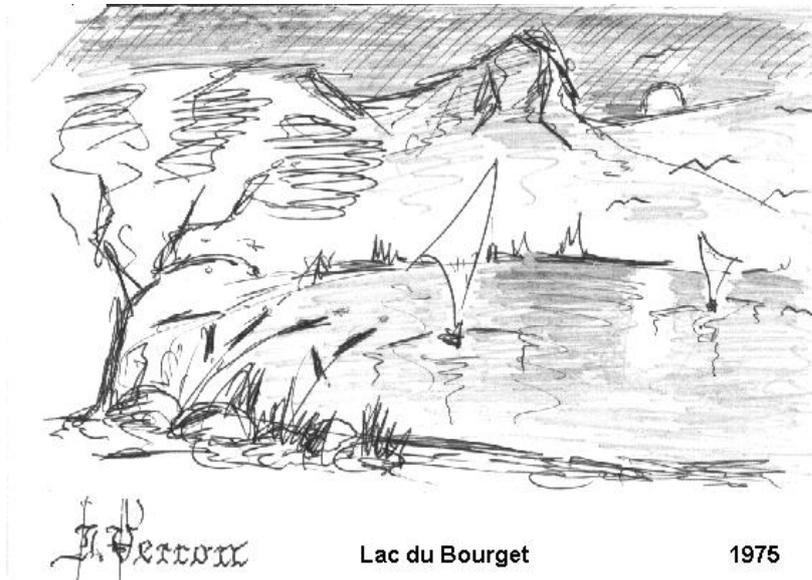


Aven sur le causse Méjean

Parc des grands Causses

L

**lac** (nom masc.) : *See (der)*étendue notable d'eau de surface à l'intérieur des terres.



Lac du Bourget

1975

**laisse de crue** (nom fém.) : *Hochwassergrenzlinie (die)* trace laissée par une crue sur un ouvrage ou d'autres supports, indiquant le plus haut niveau atteint.

**ligne de courant** (nom fém.) : *Strömungslinie (die)* lignes enveloppes des tangentes aux direction instantanées de l'écoulement à un instant donné.

**limnigraphe** (nom masc.) : *Schreibpegel ( der)* instrument qui enregistre les variations du niveau de l'eau en fonction du temps.

## M

**Maillet (loi empirique de)** : *empirisches Gesetz von Maillet (das)* elle exprime la décrue (période de décroissance du débit d'un cours d'eau) et aussi le tarissement ( décroissance du débit d'une nappe souterraine alimentant le cours d'eau pendant la période sans pluie) sous la forme d'une équation exponentielle décroissante :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

$Q_t$  : débit au bout de  $t$  jours,  $Q_0$  : débit initial,  $\alpha$  : coefficient de décrue ou de tarissement.

**marais** (nom masc.) : *Sumpf (der)* terre basse inondée en périodes de pluies et généralement gorgée d'eau en tous temps.

**marée** (nom fém.) : *Gezeiten (die)* baisse périodique de l'eau dans les océans et les grands lacs, due à l'attraction de la lune et du soleil.

**marnage** (nom masc.) : *Wasserspiegelschwankung (die)* variation de la hauteur d'un plan d'eau.

**matières solides** (nom fém.) : *Feststoffe (der)* matériaux transportés par l'eau depuis leur lieu de formation jusqu'au lieu de dépôt. Dans un cours d'eau ce sont des matériaux alluvionnaires transportés en suspension ou par charriage.

**méandre** (nom masc.) : *Mäander (der)* courbe décrite par un cours d'eau sinueux et constituée par deux boucles consécutives dans lesquelles l'écoulement s'effectue pour l'une, dans le sens des aiguilles d'une montre, et pour l'autre, dans le sens inverse.

**modèle** (nom masc.) : *Modell (das)* représentation sous une forme quelconque d'un objet, d'un processus ou d'un système. Un modèle est la plupart du temps une représentation d'un système d'eau, d'une série de données.

**mouille** (nom fém.) : *Kolk (der)* trou d'eau naturel creusé dans la rivière par un tourbillon permanent. Le contraire correspond à un seuil, à un banc ou à un haut-fond.



méandre du Rhône

collection Dürrenmatt

## P

**paramètre** (nom masc.) : *Parameter (der)* coefficient d'un modèle, d'une formule que l'on peut ajuster pour appliquer à un cas particulier ledit modèle ou ladite formule ; par ex : l'ajustement d'une formule pluie/débit à... tel bassin implique que l'on affecte aux paramètres de la formule les valeurs adaptées audit bassin.

**perméabilité intrinsèque** (nom fém.) : *Durchlässigkeit (die)* propriété d'un milieu poreux qui permet à des fluides (liquide ou gaz) de se mouvoir à travers ledit milieu, sous l'action combinée de la gravité et de la pression.

**phréatique (nappe)** (nom fém.) : *Grundwasserspiegel (der)* nappe d'eau souterraine libre la plus proche du sol.

**piézomètre** (nom masc.) : *Grundwasserspiegelbeobachtungpegel (der)* point d'observation dans lequel on peut mesurer le niveau de la nappe ou la charge piézométrique.

**plaine d'inondation** (nom fém.) : *Überflutungsfläche (die)* partie d'une vallée extérieure au lit principal mais contiguë à celui-ci, qui n'est submergée que lorsque le débit du cours d'eau excède la capacité de débit du lit principal.

**polluant** (nom masc.) : *Schadstoff (der)* agent altérant certaines propriétés de l'eau lesquelles la rendaient propres à certains usages.

**potentiel capillaire** (nom masc.) : *Kapillarpotenzial (das)* travail nécessaire pour monter un poids d'eau depuis la surface d'eau libre jusqu'à un point déterminé de la colonne de sol (surface de l'eau)

**potentiel gravitaire** (nom masc.) : *Gravitationspotenzial (das)* travail nécessaire pour élever un poids d'eau depuis un niveau de référence pour qu'il atteigne un niveau tel que l'eau s'y maintienne dans un piézomètre relié au point à l'étude dans le sol.

**porosité** (nom fém.) : *Hohlraumgehalt (der)* rapport du volume des interstices, dans un matériau tel que le sol, au volume total vides compris

$$V_v / V_t$$

**précipitation** (nom fém.) : *Niederschlag (der)* produit sous forme liquide ou solide de la condensation de la vapeur d'eau tombant des nuages ou déposé par l'air humide sur le sol.

**puits absorbant de drainage** (nom masc.) : *Sickergrube (die)* puits utilisé pour l'élimination des eaux polluées, des eaux drainées, des saumures, etc....

## R

**radier** (nom masc.) : *Sohle (die)* partie inférieure de la section transversale d'un canal ou d'un autre ouvrage hydraulique.

**rayon hydraulique** (nom masc.) : *hydraulischer Radius (der)* rapport de l'aire de la surface mouillée de la section droite à la longueur du périmètre mouillé dans un chenal ou une conduite :  $R = \frac{\omega}{\omega}$

X

**régime laminaireou fluvial** (nom masc.) : *strömender Zustand (der)* écoulement d'un fluide avec une vitesse constante en grandeur et en direction, la viscosité crée des pertes de charge, donc le nombre de Reynolds  $R$  est petit. L'influence de la pesanteur est grande devant l'énergie cinétique, donc le nombre de Froude  $F$  restera inférieur à 1

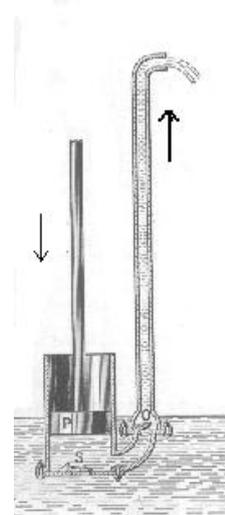
**régime turbulent ou torrentiel** (nom masc.) : *schliessender Zustand(der)* écoulement d'un fluide avec une vitesse variable en grandeur et en direction, la viscosité ne crée que peu de pertes de charge, donc le nombre de Reynolds  $R$  est grand. L'influence de la pesanteur apparaît faible devant l'énergie cinétique donc le nombre de Froude  $F$  restera supérieur à 1.

**relèvement** (nom masc.) : *Pumpen( das)* action consistant à élever de l'eau par une pompe.

**réseauhydrographique** (nom masc.) : *Gewässernetz ( das)* ensemble des rivières et autres cours d'eau permanents ou temporaires ainsi que des lacs et des réservoirs dans une région donnée.

**ressaut** (nom masc.) : *Wassersprung (der)* dans un écoulement à surface libre passage brusque de l'eau d'une profondeur plus faible que la profondeur critique, à une profondeur plus grande que ladite profondeur critique avec dissipation d'énergie.

**réservoir d'écèlement de crues** (nom masc.) : *Hochwasserrückhaltecken (das)* réservoir destiné à réduire les pointes de crue d'un cours d'eau par emmagasinement temporaire.



Encyclopédie Larousse

**Reynolds (nombre de)** : *Reynoldsche Zahl (die)* nombre sans dimension, indiquant l'influence de la force de viscosité sur l'écoulement d'un fluide :

$$R = \frac{u d}{\nu}$$

$\nu$

$u$  : vitesse de l'écoulement  $d$  : dimension du grain (par exemple)  $\nu$  : viscosité cinématique

**ripisylve** (nom masc.) : *Uferpflanzen(die)* formations végétales qui croissent le long des cours d'eau.

**ruissellement** (nom masc.) : *Oberflächenwasserabfluss (der)* partie des précipitations qui s'écoulent à la surface du sol.

S

**Saint Venant (Barre de) hypothèses de** : *Hypothesen von Saint Venant (die)* Elles décrivent mathématiquement les phénomènes et permettent la modélisation, au nombre de deux elle se présentent ainsi :

$$\frac{dQ}{dx} + \frac{dS}{dt} = 0 \quad (\text{continuité, conservation des volumes d'eau})$$

$$dQ + d(QV) + g S dz = - g S je \quad (\text{accélération motrice = résistance, conservation de la quantitémouvement})$$

dt dx dx

**sécheresse** (nom fém.) : *Trockenheit(die)* absence prolongée ou déficit marqué de précipitations.

**sédimentation** (nom fém.) : *Sedimentation(die)* processus de décantation et de dépôt par gravité des matériaux en suspension dans l'eau.

**seiche (onde longue)** (nom fém.) : *Seiche (die)* oscillation périodique de la surface d'un plan d'eau captif, causée par le vent, une variation de la pression atmosphérique ou une secousse sismique (ex : dans un port une seiche de période 100 secondes a une longueur d'onde de 15 km).

**source** (nom fém.) : *Quelle (die)* lieu d'où l'eau s'écoule naturellement du sol ou de la roche, et s'écoule à la surface du sol.

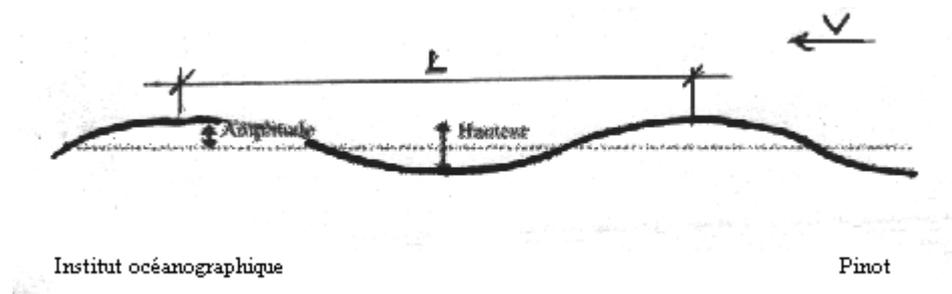
T

**talweg** ( nom masc.) : *Talweg (der)* ligne symbolique joignant la partie la plus basse d'une vallée ou d'un cours d'eau.

**tension de l'eau dans le sol** (nom fém.) : *Bodenwasserspannung (die)* dépression équivalente ou effet de pompage ou succion, présente dans le sol, elle est exprimée en unité de pression.

**tractrice (force)** (nom fém.) : *Schleppkraft (die)* force parallèle au fond du cours d'eau, exercée par le courant sur une particule de matériau immobile au fond.

**tsunami** : *Seebebenflutwelle (die)* onde marine de grande amplitude provoquée par un tremblement de terre sous-marin ou une éruption volcanique sous-marine.



**turbidité** (nom fém.) : *Trübung (die)* état d'un liquide dû à la présence de particules en suspension fines mais visibles qui gênent le passage de la lumière.

V

**vanne** (nom fém.) : *Schütz (das)* organe mobile obturant une conduite ou un canal.

**vapeur** (nom fém.) : *Dampf(der)* gaz provenant d'un liquide évaporé

## Register der deutschen Fachausdrücke

### A

Abfluss (der),5  
Abflussganglinie (die),6  
Abflussmenge (die),4  
Abwasser (das),5  
Acidität(die),2  
Alkalität (die),2  
Anlandungen (die),2  
anthropogen,2  
Aufbereitung (die),5

### B

benthisch,2  
Bernoullische Gleichung (die),3  
Bodentextur (die),6  
Bodenwasserspannung (die),11  
Buhne (die),5

### C

Chezysche Formel (die),3  
Corioliskraft (die),4

### D

Damm (der),4  
Dampf(der),11  
Durchlässigkeit (die),9  
dürr,2

### E

Eichung (die),7  
Einzugsgebiet (das),2  
Eispailletten (die),6  
Eistau (der),5  
empirische Gesetze von Fargue (die),6  
empirisches Gesetz von Darcy (das),4  
empirisches Gesetz von Maillet (das),8  
Entlastungskanal (der),3  
Entwurfshochwasser (das)  
Bemessungshochwasser (das),4  
Erosion ( die),5

### F

Fangedamm (der),2  
Fassung (die),3  
Feststoffe (der),8  
Froudesche Zahl (die),6

### G

Gerinne (das),3  
Geschiebeführung (die),3  
Gewässerkunde (die),6  
Gewässernetz ( das),10  
Gezeiten (die),8  
Gravitationspotzial(das),9  
Grundwasserhöhenlinie (die),7  
Grundwasserspiegel (der),9  
Grundwasserspiegelbeobachtungp  
egel (der),9

### H

häusliches Abwasser (das),5  
Hochwasser (das),4  
Hochwassergrenzlinie (die),8  
Hochwasserrückhaltebecken,10  
Hohlraum (der),2  
Hohlraumgehalt (der),9  
hydraulischer Radius (der),10  
Hydrolyse (die),6  
Hygrometer (das),7  
Hypothesen von Saint Venant (die),10

### I

Industrieabwasser (das),5  
Infiltration (die),7  
Isotherme (die),7

### J

Jökulhlaup (das),7

### K

Kalzium-Karbonatgleichgewicht (das),5  
Kapillarpotenzial (das),9  
Karst ( der),7  
Klärwasser (das),5  
Kohlendioxid (das),6  
Kolk (der),9  
Kondensation (die),4

### L

Linie gleichen Drucks (die),7

### M

Mäander (der),9  
Messkanal (der),3  
Modell (das),9  
Mündungsbereich (der),5

### N

Näherungsformel von Dupuit (die),4  
Nebenfluss (der),2  
Niederschlag (der),9  
Niederschlagsganglinie (die),7

### O

Oberflächenwasser (das),5  
Oberflächenwasserabfluss (der),10  
oberstrom,2

### P

Parameter (der),9  
Pumpen( das),10

### Q

Quelle (die),11

### R

Reynoldsche Zahl (die),10

### S

Schadstoff (der),9  
schiessender Zustand(der),10  
Schreibpegel ( der),8  
Schütz ( das),11  
Sedimentation(die),11  
See (der),8  
Seebebenflutwelle (die),11  
Seiche ( die),11  
Sickergrube (die),9  
Sohle (die),10  
Sohlschwelle (die),3  
Spitzenabfluss (der),4  
Staudamm (der) , Talsperre (die),2  
strömender Zustand (der),10  
Strömungslinie (die),8  
Sumpf (der),8

### T

Talweg (der),11  
Teich ( der) Weiher (der),5  
Triedelpfad (der),3  
Trockenheit(die),10  
Trübung (die),11

### Ü

Überflutungsfläche (die),9

*Überlaufen (das),4*  
*Überlaufwehr (das),4*  
*Überschwemmung (die),7*  
*Uferpflanzen(die),10*  
*unterstrom,2*

## V

*Vorfluter ( der),5*

## W

*wasserführendeSchicht (die),2*  
*Wasserspiegelschwankung (die),8*  
*Wassersprung (der),10*

## Z

*Zulaufkanal (der),3*  
*Zyklus ( der),4*



### Die Lorelei.

Ich weiß nicht, was soll es bedeuten,  
Daß ich so traurig bin.  
Ein Märchen aus alten Zeiten,  
Das kommt mir nicht aus dem Sinn.

## Addendum n° 3

---

### Compléments hydrotopamologiques

---

**Prévisions météorologiques quotidiennes**

**Quid des graphiques en hydrologie ?**

**Coup d'œil sur la juridiction des cours d'eau**

**Un aperçu de l'hydrologie statistique ....**

**Notions de stratigraphie et de tectonique**

**Bibliographie**



# 1 Prévisions météorologiques quotidiennes

Ricordi tu quando tratti delle acque

Allegare l'esperienza e in seguito il ragionamento<sup>145</sup>Leonardo da Vinci

## 11 Définition

Il s'agit des prévisions portant sur un intervalle de temps de deux à six heures.

## 12 Matériel

Il convient de disposer d'un bon baromètre car une variation de 2 mm indique une instabilité.

## 13 Observations

### 13.1 Forme des nuages

Les cumulo-nimbus doivent être considérés comme annonciateur de pluie.

### 13.2 Direction des nuages

Par exemple en région parisienne le vent d'Ouest et le Noroît apportent avec eux les précipitations.

### 13.3 Petits nuages moutonnés

Dans un ciel clair, ils dénotent la présence de l'avant-garde d'un système nuageux.

### 13.4 Nuages à forme d'enclume

En période orageuse ces nuages marquent l'approche d'un orage à court terme.

### 13.5 Force du vent

Le haut de l'échelle Beaufort ne va pas de pair avec la pluie, en revanche " petite pluie abat grand vent ".

### 13.6 Stabilisation du vent

S'il se stabilise cela indique un équilibrage entre front chaud / front froid d'où risque de brouillard.

### 13.7 Vent tourbillonnant

Si la pluie menace un vent tourbillonnant garantit la pluie dans quelques minutes.

### 13.8 Vol des hirondelles

Si elles volent bas en poursuivant les insectes descendus sous la baisse de pression, la pluie se rapproche.

### 13.9 Gelée blanche

Elle correspond à un dépôt d'humidité signe avant-coureur de pluie et non une aggravation du froid comme on le croit.

### 13.10 Brumes

Leur présence au lever du soleil présage d'un après-midi ensoleillé.

### 13.11 Ciel neigeux

Si l'on observe : plafond bas, absence de vent, ciel uniformément gris verdâtre.

### 13.12 Couleur du ciel

Si au levant l'on voit le ciel rouge il s'agit d'un indice défavorable ; par contre s'il apparaît rouge au couchant le beau temps devrait être présent le lendemain .

### 13.13 Halo de la lune

Un halo continu au contact de la lune marque une forte concentration d'humidité dans l'atmosphère et implique une probabilité de pluie.

Un halo en couronne éloigné de l'astre (forme d'arc en ciel) résulte directement de cristaux de glace à haute altitude et présage donc du froid.

### 13.14 Brillance des étoiles

Après une chaude journée si les étoiles deviennent peu brillantes dans un ciel clair, cela dénote une condensation aqueuse accrue génératrice d'orage.

---

<sup>145</sup> Souviens –toi quand tu traites de l'eau d'alléguer l'expérience et ensuite le raisonnement

## 2 Quid des graphiques en hydrologie ?

Lorsqu'on veut représenter un phénomène en rapportant des résultats d'observations, on est conduit souvent à utiliser le système de représentation graphique avec coordonnées .

Il convient alors de déterminer avec soin les paramètres dudit graphique sinon l'on s'expose à donner une image parfois fort déformée de la réalité, d'autant que le système Excel permet de réaliser facilement force graphiques entraînant ipso facto une prolifération de ces derniers.

Prenons quelques contre-exemples :

- les précisions illusoires : si l'on donne le nombre d'habitants d'une ville à l'unité près,
- les moyennes sans signification : les 50 habitants / km<sup>2</sup> de l'Egypte dont la quasi-totalité est un désert et une petite partie surpeuplée,
- les comparaisons de choses non comparables : confronter en € les revenus d'un paysan français et d'un paysan africain,
- les corrélations abusives : *après cela, donc à cause de cela* par exemple la panne d'électricité new-yorkaise et la natalité subséquente,
- les résultats impressionnants qui ne veulent rien dire : on construit un logement par minute

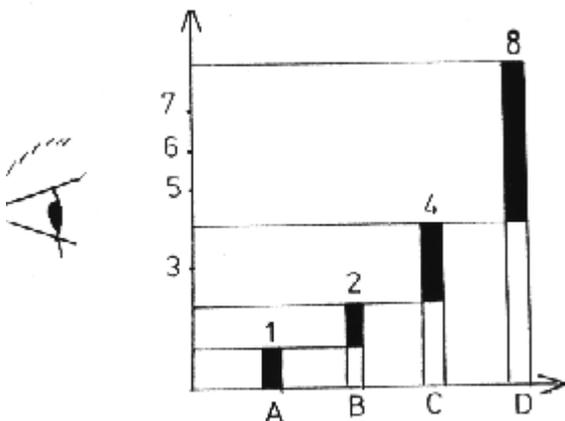
### Choix des échelles

Il ne faut pas hésiter à utiliser l'échelle logarithmique au détriment de l'échelle arithmétique classique, en effet la courbe logarithmique visualise le MULTIPLICATEUR mais PAS le produit de la multiplication

En particulier l'échelle semi-logarithmique, c'est-à-dire, l'abscisse en arithmétique et l'ordonnée en logarithmique s'avère fort utile.

Dans le premier exemple *infra*, il n'existe rien de constant dans le graphique arithmétique, alors que cela se remarque dans le graphique semi-logarithmique.

Exemple 1

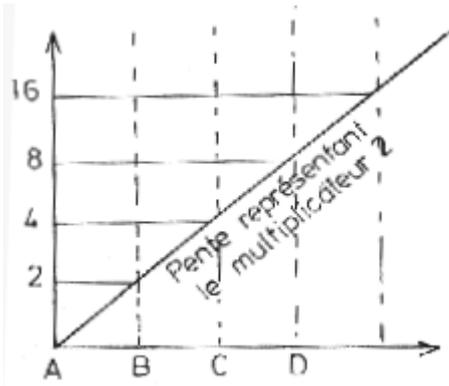


Il n'y a VISUELLEMENT rien de CONSTANT dans ce diagramme ; l'oeil y voit les ombres absolues : 1, 2, 4, 8, et leur différence en noir.

Pourtant :

$$B = A \times 2 ; C = B \times 2$$

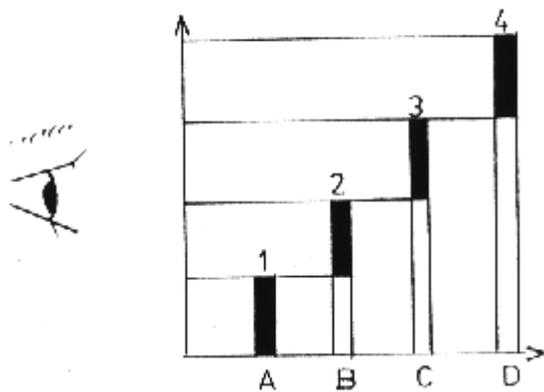
$$D = C \times 2$$



C'est cette CONSTANCE 2 que l'oeil voit dans le diagramme semi-LOGARITHMIQUE, mais SANS notion visuelle des nombres absolus NI de leur différence.

Dans le second exemple infra au contraire le diagramme indique une différence constante alors que le diagramme semi-logarithmique montre lui l'inégalité des variations.

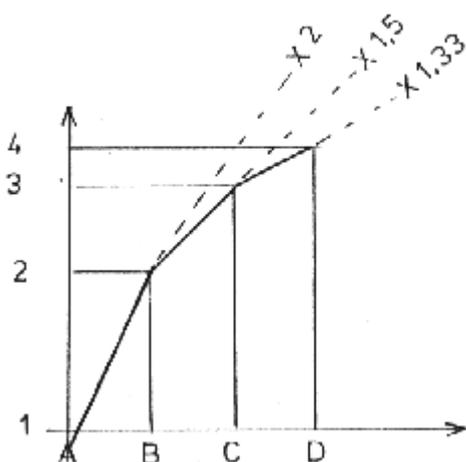
Exemple 2



Inversement, lorsqu'un diagramme montre une différence CONSTANCE, celle-ci correspond à des variations INEGALES.

$$B = A \times 2 ; C = B \times 1,5$$

$$D = C \times 1,33$$



Ce sont ces INEGALITES que l'oeil voit dans ce diagramme, et que le LECTEUR doit comprendre et mesurer à l'aide de la légende.

N.B. : La légende en semi-logarithmique ne peut être conçue comme en arithmétique

L'**étalonnage** d'un graphique semi-logarithmique est fourni par le module, c'est - à - dire la distance choisie pour représenter une croissance de 1 à 10.

### 3 Coup d'œil sur le régime juridique des cours d'eau

#### 1 Etymologie de cours d'eau

Il provient du latin *cursus*, i : course, cours, et désigne dès le XIII<sup>ème</sup> siècle, le mouvement d'une eau courante : à cours, s'ajoute eau, ce syntagme qui associe le "déterminé" cours et le "déterminant" eau a été lexicalisé au même titre que chemin de fer.

Il s'agit d'un terme générique englobant aussi bien un fleuve qu'un ruisseau ou une rivière.

#### 2 Définition

L'existence d'un cours d'eau est juridiquement caractérisée par :

- la permanence du lit
- l'alimentation suffisante (nécessité d'une source) pour qu'il ne se limite pas à des rejets ou à des eaux de pluie.



- le caractère naturel du cours d'eau, cf. photographie supra, même si l'écoulement s'effectue via une rivière canalisée remplaçant le lit naturel, cf. photographie infra.



### 3 Historique

La législation découle directement du droit romain, selon lequel les rivières navigables constituaient une "*res publica*" donc restaient publiques contrairement aux autres.

Le roi Charles IX par l'ordonnance de Moulins, en 1566, plaça dans le domaine royal, les rivières navigables et flottables.

L'arrêté du Directoire du 19 ventôse an VI subordonne à une autorisation administrative toute action relative à ces dites rivières.

L'article 538 du Code civil stipule :

*" Les chemins, routes et rues à la charge de l'état, les fleuves et rivières navigables ou flottables, les rivages, lais et relais de la mer, les ports, les havres, les rades et généralement, toutes les portions du territoire français qui ne sont pas susceptibles d'une propriété privée, sont considérés comme des dépendances du domaine public."*

La loi du 3 avril 1898 votée sous la 3<sup>ème</sup> république et celle du 16 décembre 1964 sous la 5<sup>ème</sup> n'apportèrent que des modifications mineures.

Depuis 1964, les rivières supra sont appelées "domaniales" et les autres "non domaniales" car elles restent propriétés des riverains par moitié.

### 4 Eaux pluviales et de ruissellement

#### 41 Eaux pluviales privées

##### 41.1 Propriété des eaux pluviales

Aux termes de l'article 641 du code civil "*Tout propriétaire a le droit d'user et de disposer des eaux pluviales tombant sur son fonds*".

##### 41.2 Ecoulement

###### 412.1 Article 640 du code civil : (servitude du fonds inférieur)

*" Les fonds inférieurs sont assujettis envers ceux qui sont plus élevés à recevoir les eaux qui en découlent" "naturellement sans que la main de l'homme y ait contribué".*

*" Le propriétaire inférieur ne peut point élever la digue qui empêche cet écoulement".*

*"Le propriétaire supérieur ne peut rien faire qui aggrave la servitude du fonds inférieur".*

###### 412.2 Article 681 du code civil : (servitude des toits)

*"Tout propriétaire doit établir des toits de manière que les eaux pluviales s'écoulent sur son territoire ou sur la voie publique ; il ne peut les faire verser sur le fonds de son voisin".*

## **42 Les eaux pluviales publiques**

En liminaire : Il importe de souligner que le domaine public IMPRESCRIPTIBLE et INSUSCEPTIBLE de servitude, est d'assiette terrestre : chemins, rues, routes, caniveaux..., les eaux qui y coulent ne sont pas publiques tant qu'elles n'ont pas été dérivées pour alimenter une fontaine par exemple.

### **42.1 Ecoulement sur voie publique**

Les eaux pluviales tombant sur les voies publiques ou qui y découlent de terrains supérieurs, sont généralement recueillies dans des fossés latéraux, des caniveaux, des aqueducs.

Il incombe à l'administration de créer des fossés, des caniveaux, des aqueducs et de les entretenir.

### **42.2 Ecoulement dans les égouts**

Les égouts publics appartiennent au domaine public communal et en vertu de l'article L. 33 du Code de santé publique, le raccordement des immeubles aux égouts, reste obligatoire.

### **42.3 Ecoulement dans les rivières**

Que les rivières soient domaniales ou non, leur finalité naturelle résidant la réception des eaux pluviales provenant des talwegs de leur bassin-versant, les riverains se trouvent fondés :

- de les expédier dans les rivières domaniales après obtention de l'autorisation réglementaire
- de les envoyer dans les rivières non domaniales en respectant le règlement de police de ce type de cours d'eau.

## **5 Les eaux souterraines**

### **51 Propriétés des eaux souterraines**

#### **51.1 Propriété du tréfonds liée à celle du fonds**

La propriété du fonds comportant celle du tréfonds selon l'article 552 du code civil, le propriétaire se trouve aussi propriétaire par droit d'accession des eaux souterraines qui s'incorporent au sous-sol.

#### **51.2 Interception des veines d'eau par des fouilles du propriétaire**

Selon l'article 552 du code civil et par une jurisprudence constante, *le propriétaire du fonds jouit du droit de couper par des fouilles sur son fonds, les veines d'eau alimentant le puits du voisin.*

#### **51.3 Détournement des veines d'eau par des travaux publics**

Contrairement au cas précédent, la puissance publique doit indemniser les dommages liés à l'interception des veines d'eau souterraine due aux travaux publics.

### **52 Puits**

Celui qui creuse un puits sur son fonds, ne fait qu'user de son droit de propriété inscrit à l'article 552 supra du code civil et, de ce chef, ne saurait encourir une responsabilité quelconque à l'égard des voisins dont il aurait tari les eaux (sauf intention de nuire).

### **53 Protection des ressources aquifères**

#### **53.1 Déclaration d'utilité publique**

*" La dérivation des eaux, d'un cours d'eau non navigable et non flottable  
d'une source  
d'une nappe souterraine*

*entreprise dans un but d'intérêt général par une collectivité publique, est autorisée par un acte déclarant d'utilité publique les travaux".* En vertu des dispositions de l'article 113 du code rural

**N.B.** Cet acte détermine le volume d'eau susceptible d'être prélevé.

### **53.2 Mines et carrières**

Certaines dispositions du code minier assurent la protection des eaux souterraines au voisinage des mines et des carrières.

### **53.3 Périmètre de protection**

La loi du 16 décembre 1964 prévoit des zones à l'intérieur des quelles tout captage ou puisage est soumis à autorisation administrative.

## **6 Les sources**

### **61 Propriété**

#### **61.1 Propriété liée au fonds**

*"Celui qui possède une source dans son fonds peut toujours user des eaux à sa volonté dans les limites et pour les besoins de son héritage"*, selon l'article 642 du code civil

#### **61.2 Doctrine sur les sources**

Il faut discriminer la matière des eaux de sources "*aqua perennis*" des eaux courantes "*aqua profluens*".

De ce que les eaux de source sont toujours des eaux vives, il ne s'ensuit pas qu'elles soient courantes.

#### **61.3 Non détournement du ruisseau issu de la source**

*" Mais si, dès la sortie du fonds d'où elles surgissent, les eaux de source forment un cours d'eau offrant le caractère d'eaux publiques et courantes, le propriétaire ne peut les détourner de leur cours naturel au préjudice des usagers inférieurs"*, selon l'article 643 du code civil.

#### **61.4. Servitudes**

Voici les servitudes qui peuvent être constituées sur des sources :

- puisage (servitude discontinue)
- abreuvoir "
- lavoir "
- prise d'eau (potable ou d'irrigation)

## **62 Sources spéciales**

### **62.1 Sources affectées à l'eau potable**

Les municipalités acquièrent les sources nécessaires à leur alimentation en eau potable. Dès acquisition, ces sources entrent dans le domaine public communal ; cette domanialité entraîne l'inaliénabilité des eaux.

### **62.2 Sources minérales et thermales**

Le propriétaire du fonds sur lequel jaillit la source minérale ou thermale est propriétaire de ses eaux et peut donc en user privativement.

Les sources d'eau minérale ou thermale peuvent également appartenir à l'état, à des régions, à des départements, à des communes, à des institutions charitables.

## 7 Les cours d'eau

### 71 Cours d'eau domaniaux



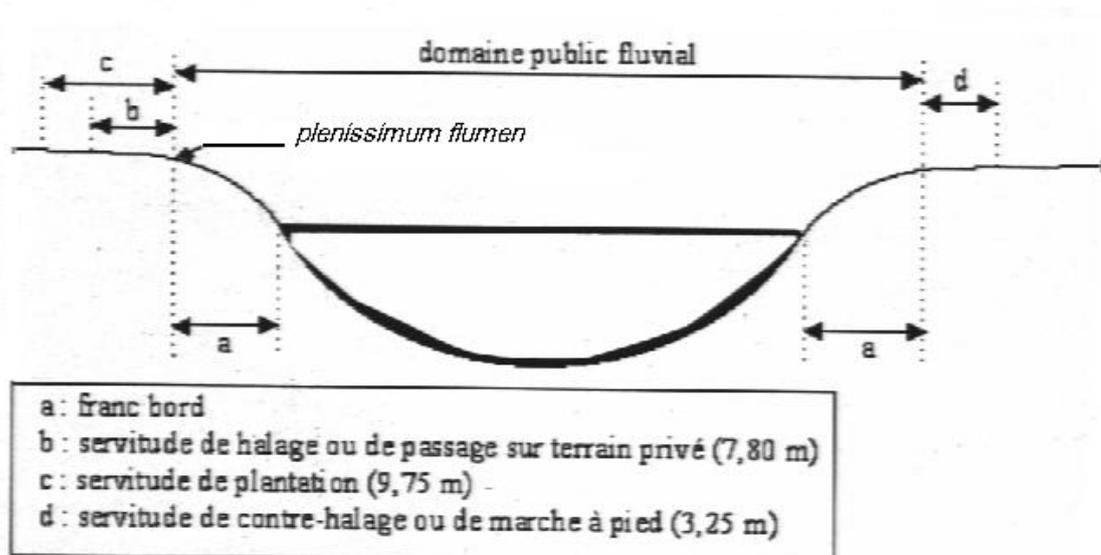
Il s'agit des cours d'eau navigables et flottables. La photographie supra montre la Loire (cours d'eau domanial) à son origine.

#### 71.1 Ordonnance du roi Louis XIV en 1666

Elle comporte un paragraphe XVIII intitulé : "De la police et conservation des forêts, eaux et rivières".

Depuis cette époque, le service des Ponts et Chaussées, puis son successeur, le Service de l'Équipement (D.D.E.) par le truchement du sous-service " Service de la Navigation " applique les lois nouvelles qui ont repris "mutatis mutandis" l'ordonnance du 17<sup>ème</sup> siècle.

Elles entraînent en particulier des **servitudes** en bordure des cours d'eau résumées sur le schéma *infra*



Agence de l'eau Graie

### 72 Cours d'eau non domaniaux



La photographie supra montre la Rive (cours d'eau non domanial) à Bourg d'Oisans

### **72.1 Propriété du cours d'eau<sup>146</sup>**

**721.1 Du lit :** L'article 98 du code rural stipule :

*" Le lit des cours d'eau non domaniaux appartient aux propriétaires des deux rives.*

Si les deux rives appartiennent à des propriétaires différents, chacun a la propriété de la moitié du lit, selon une ligne supposée tracée au milieu du cours d'eau".

**721.2 Des berges:** Leur propriété revient aux riverains qui peuvent se protéger par la construction de digues, contre les débordements du cours d'eau bordant ou traversant son héritage.

Cela peut augmenter la vitesse de l'écoulement et porter préjudice à l'aval ; d'où beaucoup de procès entre avaliers et amontiers.

**721.3 Des atterrissements, des îlots :** Les alluvions, atterrissements, etc... appartiennent aux riverains, selon l'article 551 du code civil.

*" Tout ce qui s'unit ou s'incorpore à la chose appartient à son propriétaire ".*

**721. 4 De l'eau :** L'eau reste un " *res nullius* " et n'appartient PAS aux propriétaires.

### **72.2 Usage de l'eau**

**722.1 Limites d'usage :**

*" Les riverains n'ont le droit d'user de l'eau courante qui borde ou traverse leurs héritages que dans les limites déterminées par la loi ".*

Le législateur par le truchement des préfets prend les mesures relatives au libre écoulement de l'eau en vue en vertu de l'article 97 du code rural

- de tenir les eaux à une hauteur qui ne nuise à personne
- d'en faciliter le libre écoulement
- de les diriger vers l'utilité générale

**722.2 Irrigation :** Le droit du riverain ne constitue pas un droit de propriété, mais un droit réel "sui generis". Donc le riverain a le droit de se servir des eaux pour irriguer ses fonds même non riverains.

### **72.3 Droit d'extraction**

---

<sup>146</sup> Le mot rival provient du latin *rivalis, is* lequel dérive de *rivus, i* : ruisseau, indiquant donc que les ruisseaux créaient des conflits

En vertu de l'article 98 du code rural : *" Chaque riverain a le droit de prendre dans la partie du lit qui lui appartient, tous les produits naturels, et d'en extraire de la vase, du sable et des pierres, à condition de ne pas modifier le régime des eaux et d'en exécuter le curage "*.

#### **72.4 Droit de pêche**

En vertu de l'article 107 du code rural *" Les propriétaires riverains ont, chacun de leur côté, le droit de pêche jusqu'au milieu du cours d'eau "*.

#### **72.5 Droit sur la pente (énergie hydraulique)**

La pente des cours d'eau n'est pas susceptible de propriété privée, aussi dès 1866, le Conseil d'Etat s'est exprimé ainsi :

*" Il appartient à l'Administration, d'autoriser, selon les circonstances et en vue de l'utilité générale, les riverains d'établir des moulins et des usines..."*

#### **72.6 Devoir des riverains**

**726.1 Devoir de curage :** En vertu de la loi du 14 floréal an XI :

*" Le riverain doit exécuter le curage selon la manière prescrite par les usages locaux "*. Ce texte fut d'ailleurs repris dans l'article 115 du code rural.

MAIS un riverain ne peut effectuer qu'une action fragmentaire et artisanale. En général, le syndicat de rivière le fait réaliser par une entreprise.

**726.2 Rôle du curage :**

Il doit assurer :

- le faucardement des herbes
- la réfection des berges
- l'enlèvement des dépôts
- la suppression des arbres tombés

## **8 Les eaux stagnantes**

### **81 Définitions**

Un **lac** est un amas d'eau provenant de sources, de pluie, formé dans un pli naturel de terrain et non sujet à être desséché. Il s'agit de l'œuvre de la nature.

Un **étang** est un amas d'eau soutenu par une chaussée que l'on peut dessécher, soit pour prendre le poisson, soit pour mettre le terrain en culture.

Un **marais** est un terrain plat recouvert d'une eau profonde, généralement envahi de végétation improductive.

Une **mare** est un petit amas d'eau créé par un particulier qui ne peut s'effectuer qu'avec l'autorisation du maire pour des raisons de salubrité.

### **82 Classement**

**Domaniaux :**

- les étangs salés communiquant avec la mer
- ceux traversés par une rivière domaniale
- lacs affectés à la navigation (Annecy, Le Bourget )

**Non domaniaux :**

- les autres

### **83 Limites**

Les lacs et étangs, bien qu'ils soient en crue à certains moments, et se dessèchent à d'autres, gardent leurs limites. Le droit d'alluvions n'est pas reconnu pour eux <sup>147</sup>

### **84 Intervention administrative**

L'administration n'intervient que sur les lacs et étangs domaniaux.

### **85 Dessèchement des marais**

Il peut être entrepris par :

- le propriétaire
- un syndicat
- l'état ou une collectivité territoriale

#### **9 Police**

Elle relève de deux juridictions

- judiciaire (procureur de la république, officier de police)
- administrative : D.D.E. (conducteur voie navigable) pour cours d'eau domaniaux  
D.D.A. (préfet) pour cours d'eau non domaniaux

Voir arrêté *infr* sur un canal d'irrigation

---

<sup>147</sup> Traduction du code romain, loi du digeste 12 : "Lacus et stagna, licet interdum crescant, interdum exaescant, suos tamen terminos retinent, ideoque in his jus alluvionis non agnoscitur".

PRÉFECTURE  
DE  
LA LOIRE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

3<sup>ème</sup> Division

Saint-Etienne, le \_\_\_\_\_ 1906

Canal du Forez,

Etablissement  
d'une passerelle sur  
l'artère de l'Hôpital

Commune  
Boisset-le-Montrond.

Boudol Jean  
pétitionnaire.

Le Préfet de la Loire, Commandeur de la Légion d'honneur,  
Vu la pétition en date du 20 Janvier 1906, par laquelle M.  
Boudol Jean, entrepreneur et propriétaire à Boisset-le-Montrond  
sollicite, l'autorisation de construire une passerelle sur l'artère  
du canal du Forez dite de l'Hôpital-le-Grand, pour faciliter la  
desserte de sa propriété;

Vu le plan des lieux;

Vu le décret de concession du canal du Forez en date du  
20 mai 1868;

Vu les articles 3 et 5 de l'arrêté de police du 18 mars 1821;

Vu la soumission en date du 7 mars 1806 par laquelle M.  
Boudol Jean s'engage à payer, pour l'occupation temporaire de  
terrains dépendant du canal du Forez, une redevance annuelle  
de trois francs;

Vu la décision de la Commission départementale du  
31 mars 1906;

Sur la proposition des Ingénieurs des Ponts et chaussées

Arrête:

Article 1<sup>er</sup> M. Boudol Jean est autorisé aux fins de sa  
demande à charge par lui de se conformer aux prescriptions suivantes  
Article 2<sup>e</sup> La passerelle sera établie à 1<sup>m</sup> 20 au-dessus du plan  
de l'artère de l'Hôpital le Grand, avec des supports dont l'écartement sera  
de 8<sup>m</sup> 00 au moins; ces supports seront placés à égale distance de l'axe  
de l'artère, afin de ne pas nuire au libre écoulement des eaux.

M. Boudol se conformera en outre aux instructions qui lui  
seront données par les Ingénieurs au moment de l'exécution des travaux  
Article 3<sup>e</sup> Le permissionnaire devra verser annuellement  
dans la caisse départementale la somme de trois francs payable  
d'avance.

Article 4<sup>e</sup> La présente autorisation est donnée à titre temporaire; elle sera révisable tous les cinq ans. Elle pourra d'ailleurs être retirée à toute époque si l'intérêt public l'exige et le cas échéant, le permissionnaire devra remettre à ses frais les lieux dans leur état primitif, sans pouvoir réclamer une indemnité ou un remboursement quelconque.

Article 5<sup>e</sup> Ampliations du présent arrêté seront adressées à M. l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées et à M. le Maire de Boisset-le-Montround, chargé de le notifier à l'intéressé.

Mérimé le 9 avril 1906

P. Le Prefet.

Le Secrétaire Général délégué  
signé: Heudlé

Copie conforme délivrée  
à Monsieur le Maire de Boisset-le-Montround  
pour être notifiée à l'intéressé

Mérimé le 14 avril 1906,

POUR LE PREFET

Le Conservateur De Ponts et Chaussées



## 4 Un aperçu de l'hydrologie statistique

### 1 Généralités

#### 11 Définitions

##### 11.1 Série statistique

Un caractère quantitatif constitue une variable statistique<sup>148</sup>, à chaque état de ladite variable, correspond une valeur.

L'ensemble ordonné de ces valeurs constitue une série statistique.

##### 11.2 Rangement

La collecte des observations (ou données) ayant été effectuée, lesdites données sont rangées par valeurs croissantes ou décroissantes.

On peut aussi dresser un **tableau** statistique, par exemple dans le tableau infra, on a enquêté sur 384 familles en prenant comme caractère le nombre d'enfants par famille.

Valeur ou caractère	effectif	au plus	au moins
0	83	83	384
1	110	193	301
2	80	273	191
3	76	349	111
4	35	384	35
	384		

##### 11.3 Groupement en classe

En raison de la masse des données, le tableau doit être réduit ; on constitue des classes dont l'effectif de chacune est  $\Sigma$  des effectifs correspondants aux valeurs du caractère composant la classe.

Le nombre de classes reste arbitraire et il est choisi par le statisticien.

Par exemple si l'on répertorie le nombre de pièces fabriquées dans un atelier de 100 ouvriers.

classes	effectifs
moins de 70	1
[ 70 - 75 ]	8
[ 75 - 80 ]	3

Soit  $n_1 n_2 \dots n_k$  les effectifs des différentes classes d'une série statistique, et  $n$  le nombre total des données.

$$\sum_{i=1}^k n_i = n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$$

La fréquence relative  $f$  des données d'une classe d'effectif  $n_i$  s'écrit  $f_i = \frac{n_i}{n}$

### 12. Caractéristiques de position dans une série statistique

#### 12.1 Médiane d'une série

Il s'agit d'une valeur telle, que la série ayant été ordonnée, il y ait autant de données rangées avant elle, que de données rangées après elle.

<sup>148</sup> La variable statistique est dite "discrète" si elle ne revêt que des valeurs isolées et entières sinon elle est dite "continue".

Par exemple, la série des âges de neuf personnes donne :

28 33 34 35 36 37 37 39 40

### 12.2 Moyenne arithmétique d'une série

La moyenne arithmétique de plusieurs valeurs est le quotient de leur somme par le nombre de ces valeurs.

Soit  $x_1 x_2 x_3 \dots x_i \dots x_n$  ( n valeurs )

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \text{ l'on peut écrire aussi}$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

### 12.3 Moyenne géométrique d'une série

La moyenne géométrique de n données  $x_1 + x_2 \dots x_n$  (supposées positives) est la racine n<sup>ième</sup> de leur produit.

$$x_g = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \dots x_n}$$

## 13. Caractéristiques de dispersion dans une série

### 13.1 Etendue d'une série

On appelle ainsi la différence entre la plus grande et la plus petite des valeurs de la série

$$W = x_{\max} - x_{\min}$$

### 13.2 Ecart interquartile d'une série

Les quartiles sont les TROIS valeurs de la série qui partagent les données rangées en valeurs croissantes ou décroissantes en quatre groupes du même effectif.



Q<sub>1</sub>

Q<sub>2</sub>

Q<sub>3</sub>

### 13.3 Variance d'une série

Il s'agit de la moyenne des carrés des écarts avec la moyenne arithmétique soit n données :  $x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n$

soit  $\bar{x}$  la moyenne arithmétique, leurs écarts par rapport à celle-ci s'écrivent :

$$(x_1 - \bar{x}) (x_2 - \bar{x}) \dots$$

les carrés deviennent  $(x_1 - \bar{x})^2 (x_2 - \bar{x})^2 \dots$

.....

$$\text{d'où } V = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$

### écart- type $\sigma$

$$\text{tel que } \sigma^2 = V \text{ ou } \sigma = \sqrt{V}$$

## 2. Analyse fréquentielle en hydrologie

C'est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (par exemple la pluviométrie) afin d'en définir les probabilités d'apparition future.

### 21. Définitions

#### 21.1 Probabilité d'un événement

Elle se définit comme le rapport  $\frac{\text{nombre de cas favorables à sa réalisation}}{\text{nombre de cas possibles}}$

#### 21.2 Fréquence d'un événement

Elle correspond  $\frac{\text{au nombre des cas où l'événement s'est produit}}{\text{au nombre des cas où l'événement aurait pu se produire}}$

### 22. Réalisation

#### 22.1 Principe

Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'une équation fréquentielle (modèle) décrivant le comportement statistique du processus.

Ces équations décrivent la probabilité d'apparition d'un événement donné (par exemple une intensité critique ou maximale de pluie de 50 mm/heure)

#### 22.2 Choix d'une équation

Ce choix d'une équation probabiliste se trouve souvent basé sur des habitudes locales qui, à la longue, deviennent de véritables coutumes. Examinons-en trois.

##### 22.2.1 Loi binomiale

Elle permet de calculer la probabilité de chaque événement possible.

Soit  $n$  bornes d'arrosage en réseau et  $k$  le nombre de bornes simultanément ouvertes.

Calculons la probabilité  $p^k$  pour que  $k$  bornes quelconques soient simultanément ouvertes; donc

$n-k$  seront fermées. Selon le principe de la probabilité composée elle est égale au produit de la probabilité de l'événement  $p$  et de l'événement  $q$

$$\underbrace{p_n^k = p \cdot p \cdot p \dots p \cdot q \cdot q \cdot q \dots q}_{k \text{ fois} \quad (n-k) \text{ fois}} \quad \text{avec } q = 1 - p \text{ probabilité de l'événement contraire}$$

puis comme le fonctionnement simultané de  $k$  bornes peut se réaliser d'un certain nombre de manières

$$p_n^k = C_n^k \cdot p^k \cdot q^{n-k}$$

avec  $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$  dans un tirage de 8 billes bleues et rouges l'on a 8 manières d'avoir une bille bleue

$$k!(n-k)!$$

La loi binomiale se définit par les paramètres suivants :

$$\text{moyenne : } \bar{x} = np$$

$$\text{écart-type : } \sigma = \sqrt{npq}$$

Mais si  $n$  est grand, les calculs deviennent fort longs et l'on emploie la loi normale dite de Gauss

**222.2 Loi normale dite de Gauss**

Elle traduit la distribution d'une population d'individus  $x_1, x_2, x_3, \dots$  soumis à de nombreuses causes de variation.

En 1730, Stirling a proposé une équation facilitant le calcul de n !

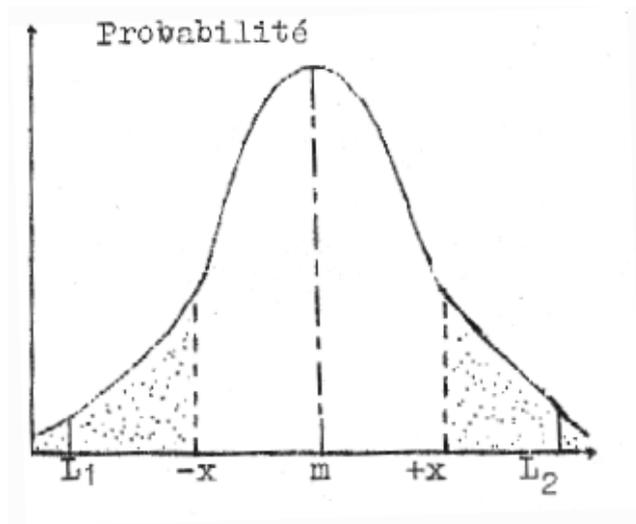
$$n! = \left(\frac{n}{e}\right)^n \cdot \sqrt{2\pi n} (1 + \varepsilon_n)$$

D'où une transformation de l'équation de la loi binomiale supra, qui devient :

$$p_n^k = \frac{1}{\sqrt{2\pi npq}} \cdot e^{-\frac{(k-np)^2}{2npq}}$$

L'on obtient la courbe symétrique et en forme de cloche. Voir infra  
 Cette courbe est parfaitement définie par sa moyenne

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$



n  
 et par son écart-type

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2}}{\sqrt{n}}$$

chaque individu de cette population s'écarte plus ou moins de la moyenne mais cette distribution reste telle qu'un individu a 95 chances sur 100 d'être compris dans les limites de sécurité :

$$L_1 = m - 2\sigma$$

$$L_2 = m + 2\sigma$$

En hydrologie fréquentielle les valeurs extrêmes des distributions ne sont pas symétriques. La loi de Gauss restera peu utilisée sauf pour les modules annuels de pluviométrie.

**222.3 Loi de Gumbel**

Elle postule que la loi double exponentielle est la forme limite de la valeur maximale d'un échantillon de n valeurs.

Elle est fort usitée en hydrologie car elle est capable de décrire les série de maxima annuels de pluie par exemple.

**22.3 Ajustement**

Lorsqu'on utilise une loi, il faut définir les paramètres de la loi retenue.

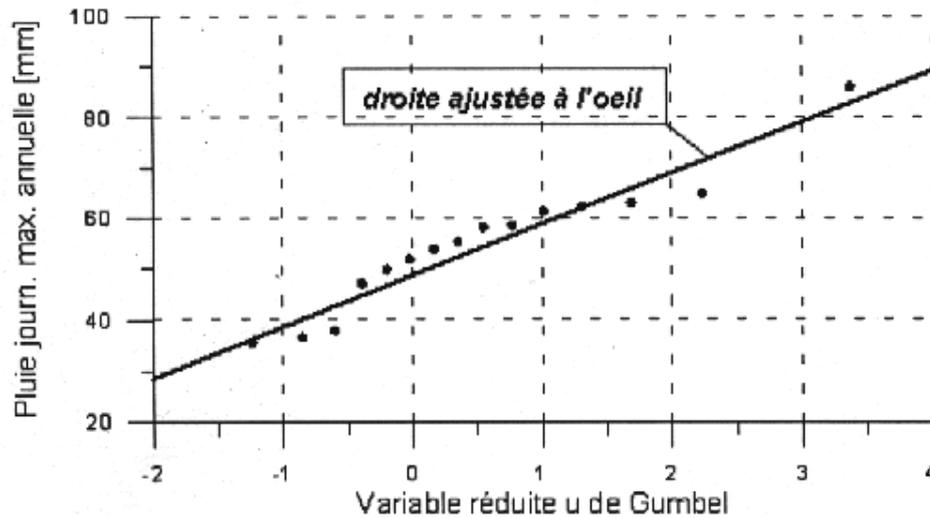
Dans le cas de la loi de Gumbel, la fonction de répartition s'écrit sous forme de double exponentielle :

$$F(u) = e^{-e^{-u}}$$

En posant  $u = \frac{x-x_0}{s}$  variable réduite

$x_0$  : paramètre d'origine et  $s$  : paramètre d'échelle

L'ajustement s'effectue souvent sous forme graphique lequel est gradué en Logarithme pour obtenir des droites.  
cf. graphique *infra*.



Il s'avère judicieux d'utiliser la distribution empirique de Hazen avec la loi de Gumbel.

#### 22.4 Incertitude

A ce stade, il faut estimer l'incertitude liée au phénomène de la fluctuation de l'échantillonnage.

On emploie les trois grandeurs classiques :

- estimation de la moyenne  $\bar{x}$
- \_ estimation de l'écart-type  $\sigma$ ,
- \_ l'estimation du quantile,

On dit que l'on obtient un quantile  $Q_{0,99}$  pour une valeur, cela signifie que ladite valeur présente une probabilité de 1 sur 100 d'être dépassée par une valeur supérieure

La valeur alors utilisée pour le projet de travaux  $x_D$  devient

$$x_D = x_q + k \sigma$$

## 4 Notions de stratigraphie et de tectonique

### 1 Stratigraphie :

#### 11 Définition :

La stratigraphie<sup>149</sup> est la science étudiant la chronologie de la mise en place des **roches sédimentaires**.

Elle est fondée :

4

- sur la prise en considération des dépôts du

terrain sédimentaire :

L'on obtiendra une échelle depuis l'origine

3

2

jusqu'aux terrains actuels.

cf. schéma ci-contre où la couche 1 est la plus ancienne

1

- sur le principe de la continuité :

Si les conditions restent identiques en tout point, on dit qu'entre deux points A et B la couche sera la

même

A

B

1

1

#### 12 Recherche :

Elle se pratique à partir :

##### 12. 1 des critères de faciès :

Ainsi l'on observe des faciès coralliens, des faciès carbonifères etc.....Des faciès peuvent être identiques avec des fossiles différents et réciproquement.

##### 12. 2 des critères de fossiles :



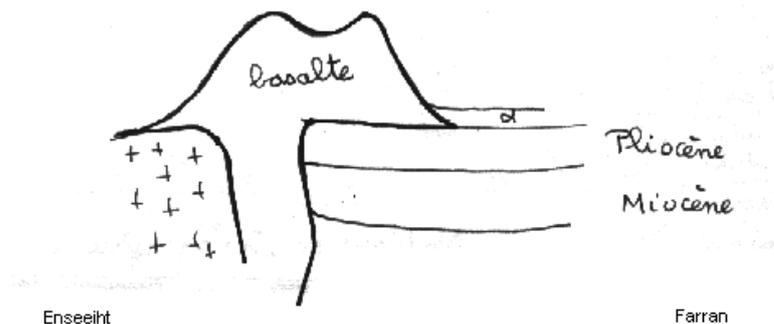
L'on recherche des coquilles d'animaux vivant à certaines époques comme les Ammonites cf. schéma ci-contre, alors que les lamellibranches très répandus restent peu intéressantes de ce point de vue.

##### 12. 3 des critères de radioactivité

Ils servent à dater les roches éruptives

Sur le schéma ci-contre,

en Auvergne, le basalte se situe entre le Pliocène et le Miocène



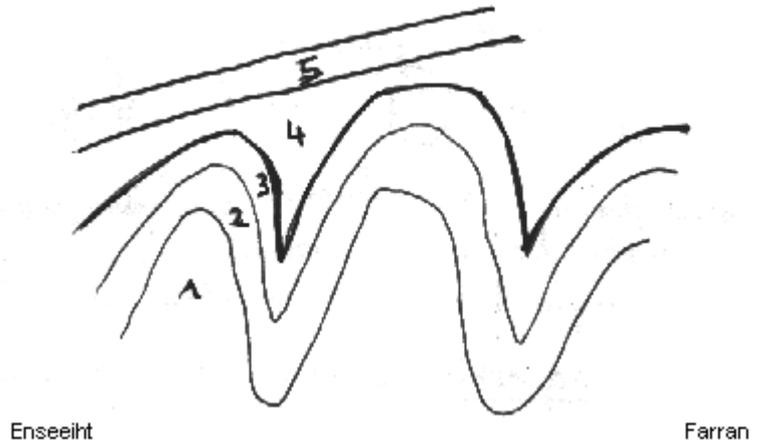
<sup>149</sup> Du latin stratum, i : chose étendue et de γράφω : écrire

**12.4 Exemples :**

**124.1 sur des plissements**

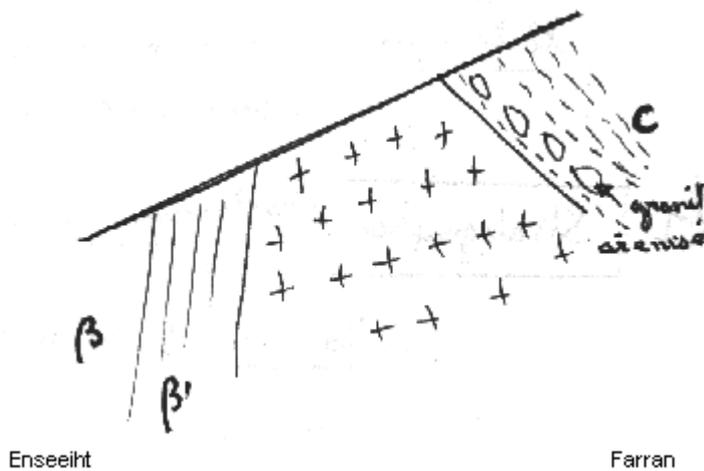
Puisque 4 et 5 sont non plissés, le plissement reste extérieur à 4

cf. schéma ci-contre



**124. 2 sur des roches métamorphisées**

La strate  $\beta'$  a été métamorphisée donc la strate  $\beta'$  est arrivée avant le granit, la strate C contenant des sédiments est arrivée après le granit.



L'on écrit

$\beta' \prec \text{granit} \prec C$

cf. schéma ci-contre

**12 Rangement des strates**

Elles se rangent selon le tableau *infra*

ères	étages	années
Quaternaire		- 1 million d'années
Tertiaire	Pliocène Miocène Oligocène Eocène	- 60 millions d'années
Secondaire	Crétacé Jurassique Trias	- 200 millions d'années
Primaire	Dévonien Silurien Cambrien	- 500 millions d'années

Il faut noter qu'après le Cambrien, l'on ne rencontre plus de couches sédimentaires.

## 2 Tectonique

### 21 Définition :

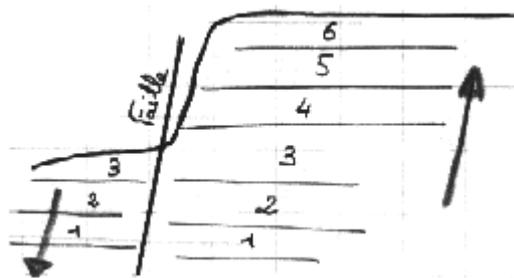
La tectonique<sup>150</sup> : science géométrique et mécanique étudiant les déformations des roches dans l'espace.

Ces déformations étant dues à des forces verticalement exercée, engendrant des failles et des flexures et à des forces tangentielles, qui elles sont génératrices de plissement

### 22 Action des forces verticales :

#### 22.1 Faille

Il s'agit d'une rupture de l'écorce terrestre entraînant une dénivellation parfois de 500 mètres



Ensar

Aubert

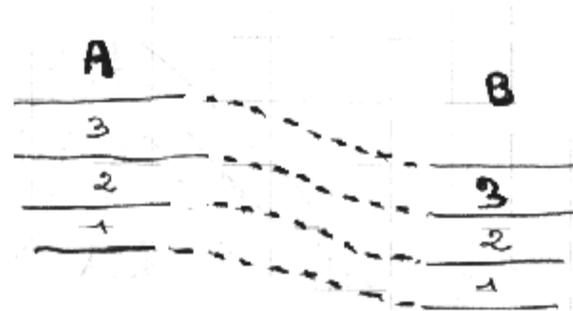
Il faut se livrer à une étude détaillée de la stratigraphie pour trouver les directions de faille

Cf. schéma ci-contre

#### 22.2 Flexure

L'on se trouve en face d'un accident dû à une cassure et à une rupture.

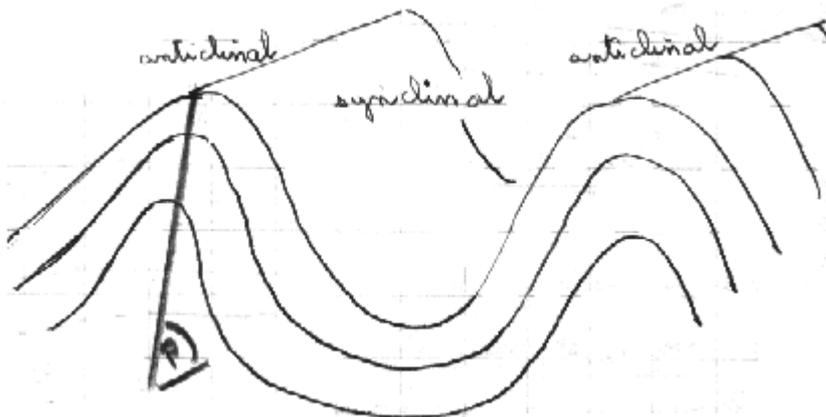
cf. schéma ci-contre



Ensar

Aubert

### 23 Action des forces tangentielles



Ensar

Aubert

Elles conduisent à des **plissements** à synclinal<sup>151</sup> et anticlinal

Ceux-ci pouvant être droit si le plan P de dislocation est vertical

Cf. schéma ci-contre

Ou bien penché avec charriage si le plan P n'est pas vertical.

<sup>150</sup> de τεκτονικός, -ή, -ό : propre à l'architecture

<sup>151</sup> de συν : avec et de κλίνω : pencher

## Bibliographie

Eléments hydrauliques par Escande - ENSEEIHT (Toulouse )

Mesures et essais par Thirriot- ENSEEIHT ( Toulouse )

Hydraulique fluviale par Etienne - ENSEEIHT (Toulouse)

Assainissement des terres par Hugues - ENSAR (Rennes)

Géotechnique par Farran - ENSEEIHT ( Toulouse )

Pluviométrie par Glard - Sud-Aménagement Agronomie (Aix-en-Provence)

Etude hydrologique du bassin-versant du Jabron par Hirsch - Ingénieurs géophysicien  
(Strasbourg)

Guide des glaces fluviales par Direction des eaux - Nouveau Brunswick (Canada)

Hydrologie statistique par Musy - Ecole polytechnique de Lausanne (Suisse)

Modèle de crue en moyenne montagne par Funke - Université de Bochum - (Allemagne)

Les chemins de l'eau par Dupriez - " Terres et vie " de Nivelles ( Belgique)

Europe's environnement Dobris assessment par l' Agence européenne de Copenhague  
(Danemark)

Mémento des eaux pluviales par le Ministère de l'équipement

Cours pour techniciens de rivière par Bouloc Centre de formation personnel territorial Midi  
Pyrénées

Hydraulité de la Drôme par Sellier- Génie rural de la Drôme

