RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre

OFB
OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ

Principaux types de contaminants d'origine agricole entrainés vers les eaux de surface, et impacts sur la qualité des milieux.

Nadia Carluer (UR RiverLy. INRAE)

2 décembre 2021

Plan de la présentation

Quels sont les principaux types de transfert hydriques vers les eaux de surface ?

- A l'échelle de la parcelle ; facteurs d'influence
- À l'échelle du versant/bassin versant

Quelques ordres de grandeur, selon les types de contaminants

- Nitrates
- Erosion. MES
- Phosphore
- Pesticides

Quelle évolution attendue de ce phénomène avec le changement climatique ?

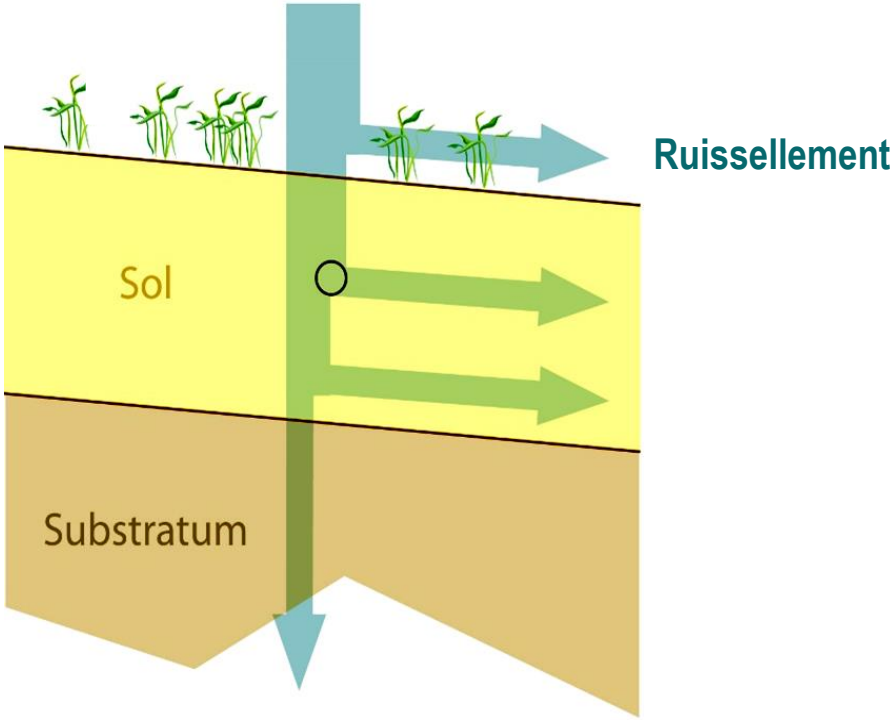
Présentation qui s'appuie sur les travaux du groupe technique « Intégration des zones tampons dans la gestion des bassins versants pour la prévention des pollutions diffuses agricoles ».

- Un site Web : https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1194
- Un séminaire dédié « Zones Tampons et qualité de l'eau – Quels freins et leviers à leur mise en œuvre ? » le 9 mars 2021 : https://zt.seminaire.inrae.fr/ avec un lien vers de nombreuses ressources
- Une formation en ligne, gratuite : https://elearning.ofb.fr/ ; formation « Zones tampons, limiter les transferts de contaminants

Différents types d'écoulements

Différents types d'écoulements

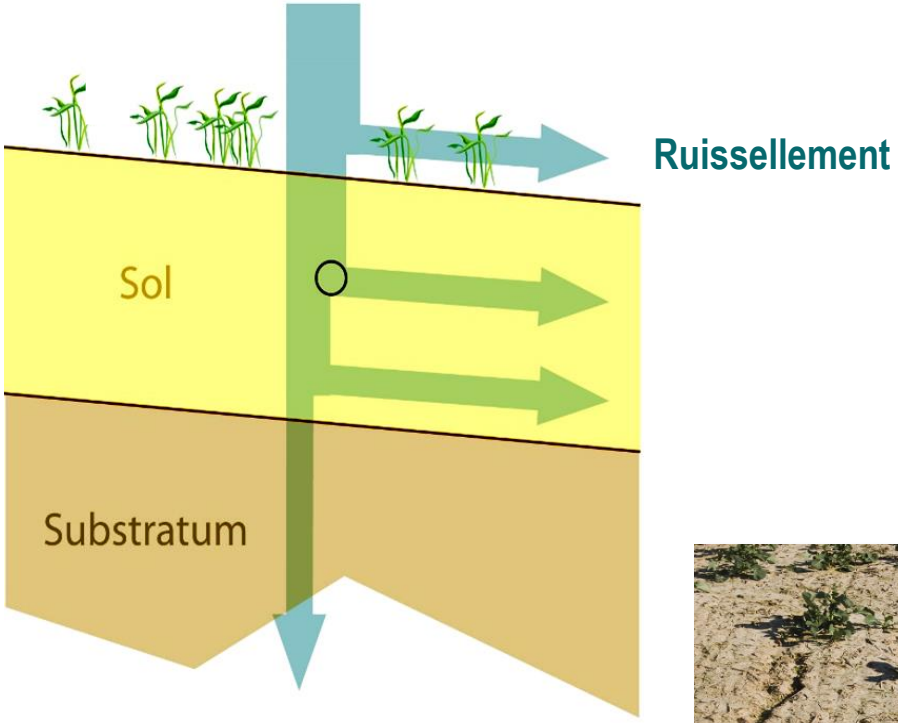
A l'échelle de la parcelle agricole



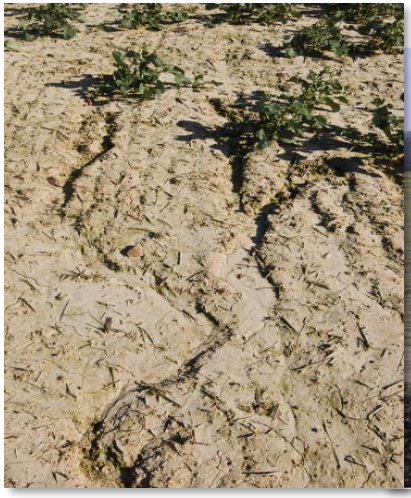
- ⇨ Ruissellement hortonien
- ⇨ Ruissellement par saturation

Différents types d'écoulements

A l'échelle de la parcelle agricole

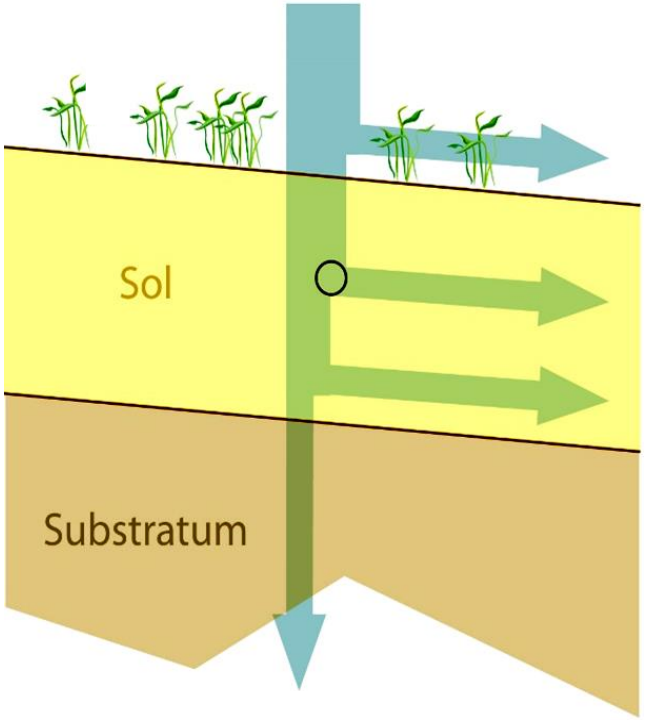


⇨ Ruissellement érosif



Différents types d'écoulements

A l'échelle de la parcelle agricole



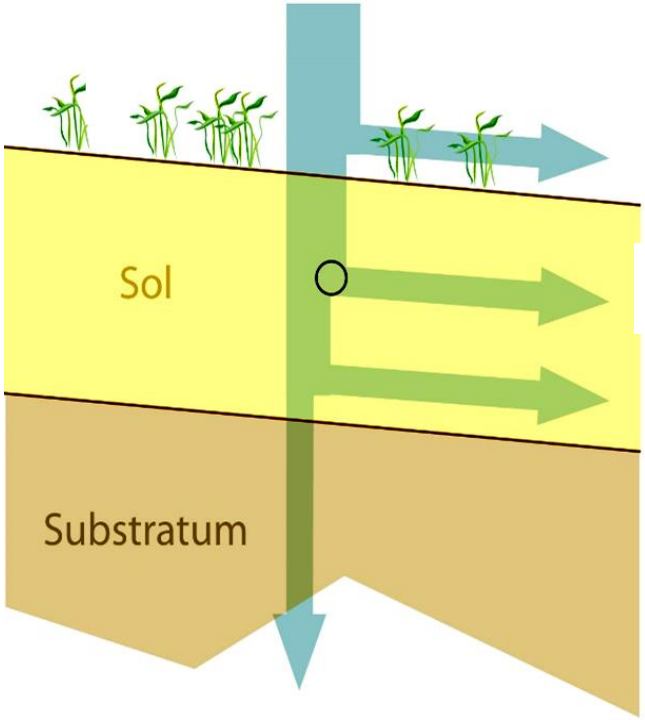
Infiltration vers la nappe

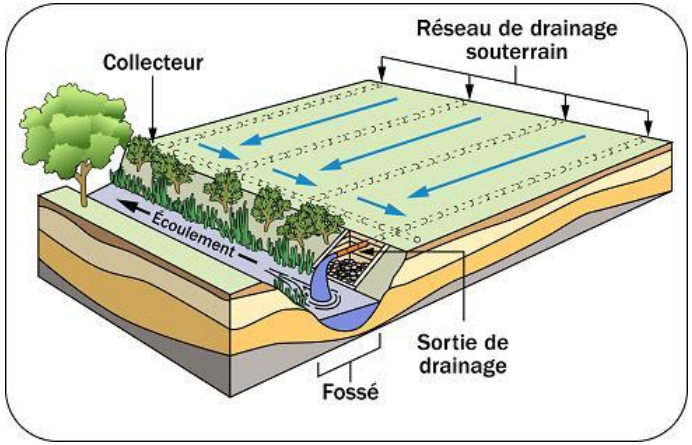
⇨ Infiltration diffuse vers une nappe souterraine

⇨ Infiltration concentrée vers une nappe souterraine

Différents types d'écoulements

A l'échelle de la parcelle agricole





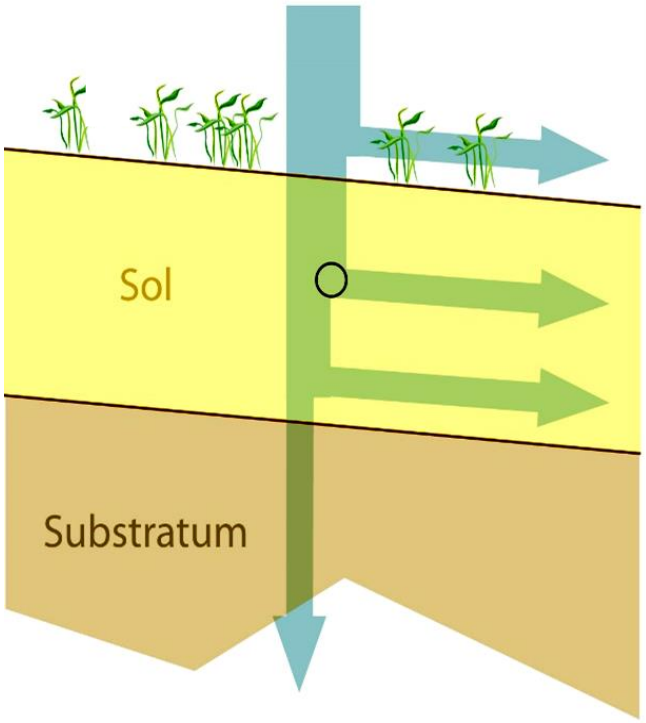
© Conyers G., 2015

Drainage agricole

⇨ Drainage par tuyaux enterrés
⇨ Collecte et transfert vers le cours d'eau

Différents types d'écoulements

A l'échelle de la parcelle agricole



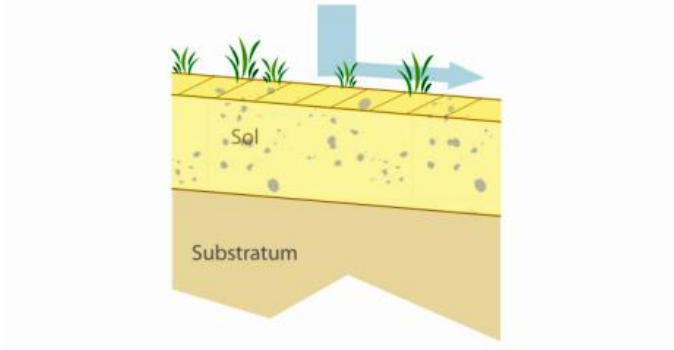
Ecoulements de subsurface

⇨ Ecoulements latéraux de subsurface

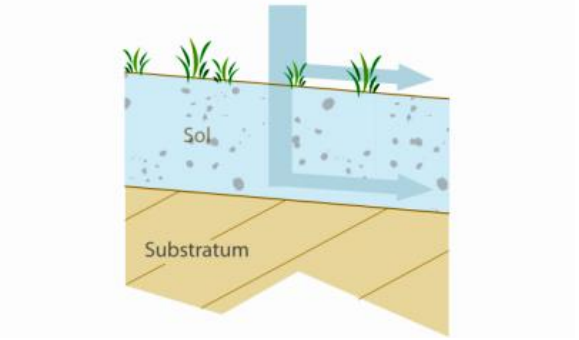
Différents types d'écoulements

Quelques exemples des déterminants des différents types de transferts

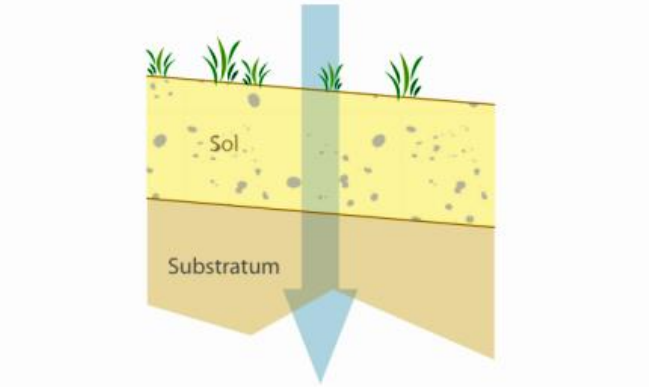
Sol sensible à la battance ou peu perméable en surface
Transferts par ruissellement hortonien dominants



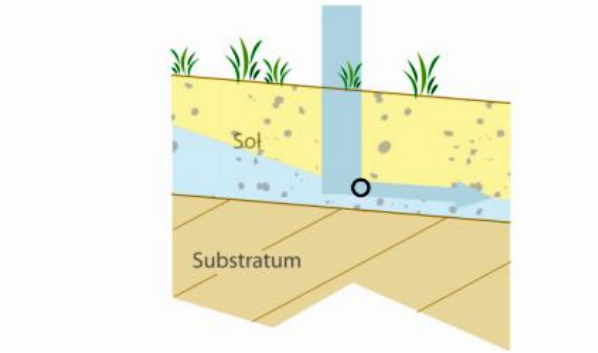
Sol hydromorphe engorgé (pente faible) sur substratum imperméable
Transferts par ruissellement sur surface saturée et écoulements hypodermiques dominants



Sol et substratum filtrants
Transferts par infiltration vers la nappe dominants



Sol hydromorphe drainé sur substratum imperméable
Transferts par drainage agricole dominants



Rôle majeur des caractéristiques du sol (influence des pratiques culturales) :

- Perméabilité (battance)
- Porosité et épaisseur (RU)
- Structure

Egalement :

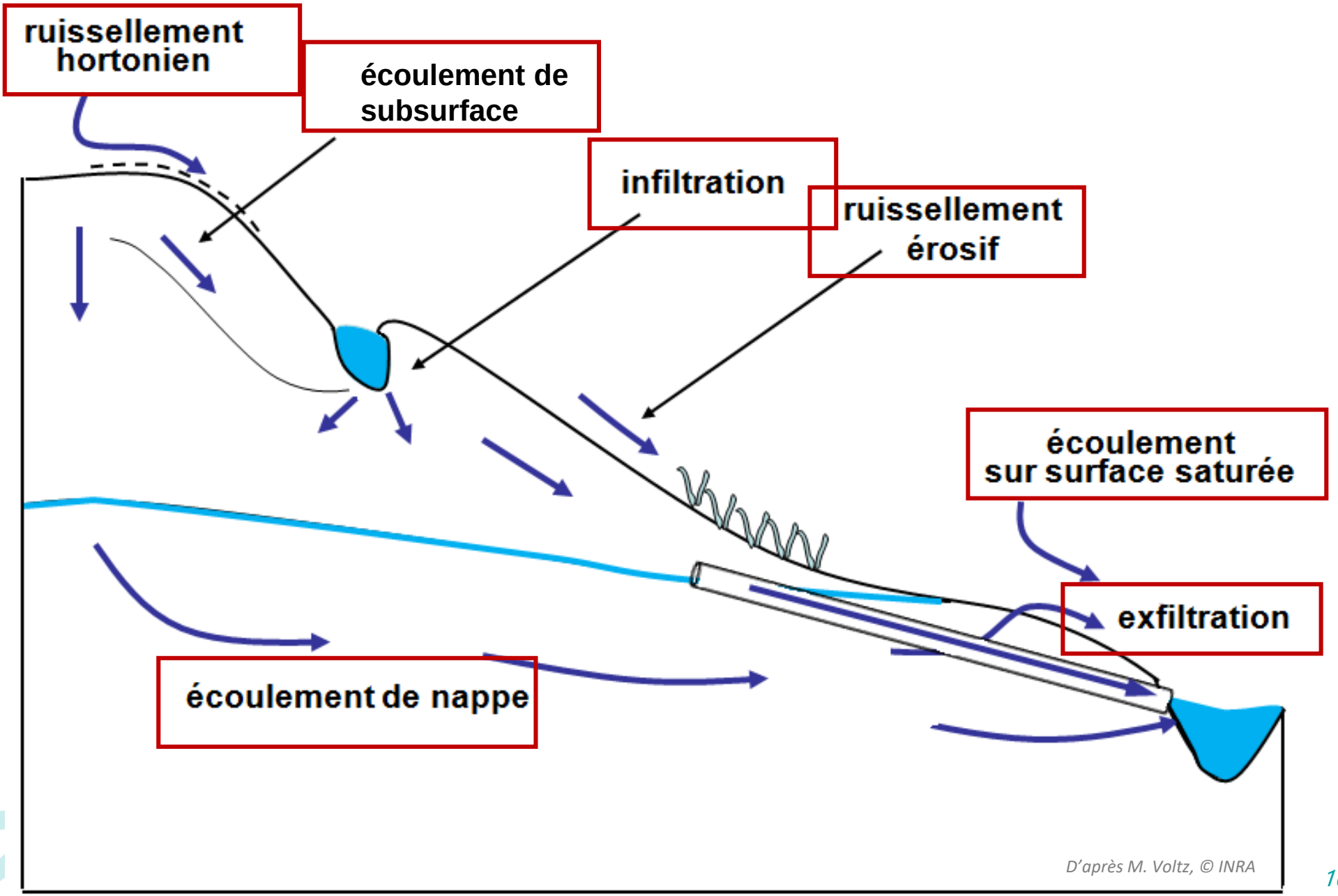
- Nature du substratum,
- Topographie,
- Climat

A analyser lors du diagnostic :

- À l'échelle de la parcelle
- A l'échelle du versant

Différents types d'écoulements

A l'échelle du versant

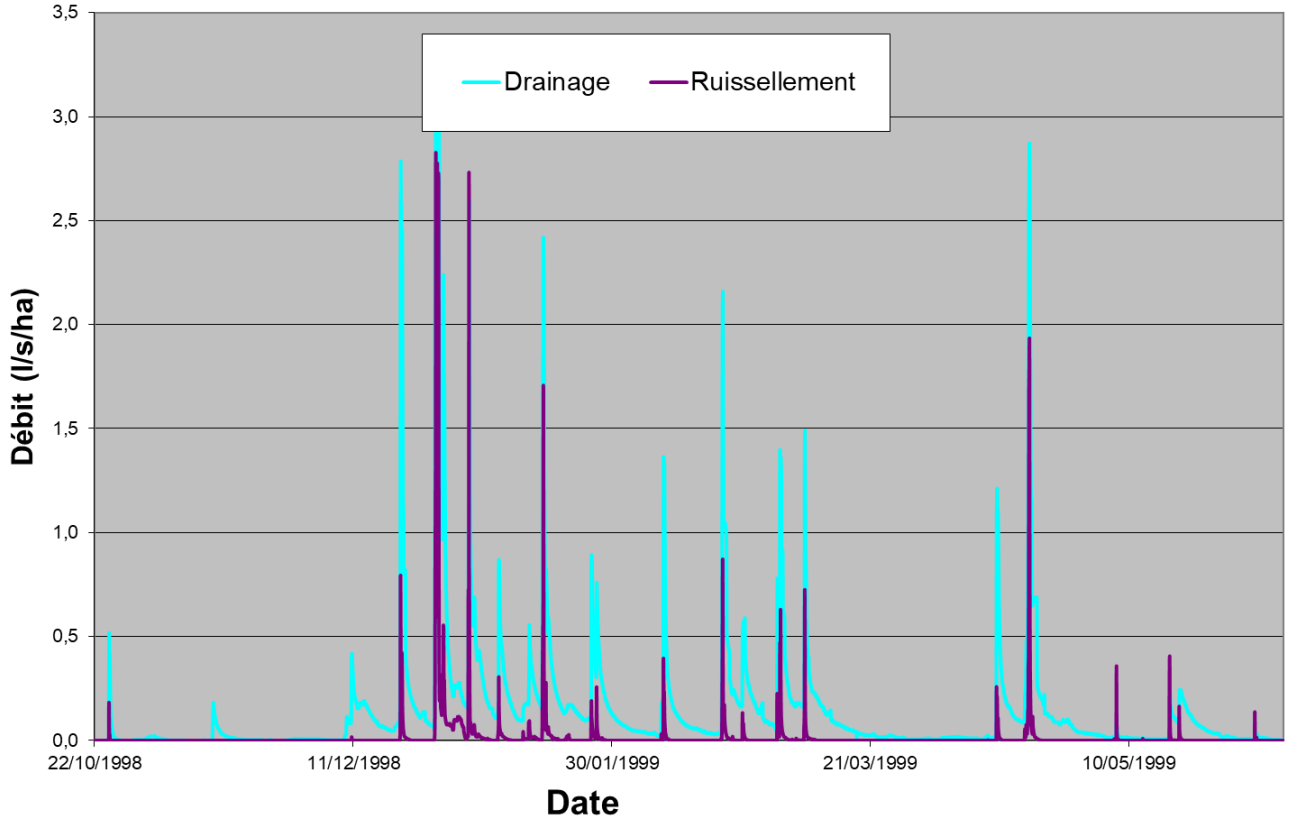


D'après M. Voltz, © INRA

Différents types d'écoulements

Quelques ordres de grandeur : en contexte drainé

Pour une pluie de 700 mm/an, également répartie mensuellement (pluies fines hivernales et pluies orageuses en printemps-été :



Débits ruisselé et drainé sur le site de La Jaillière (ARVALIS-Institut du Végétal)

- drainage agricole ou infiltration profonde de 150 à 200 mm/an (principalement de déc. à avril : saisonnalité)
- ruissellement de 10 à 20 mm/an (épisodes très courts, répartis sur l'année)

Différents types d'écoulements

Quelques ordres de grandeur : en contexte de socle (Bretagne)

- pluie efficace (qui contribue à l'écoulement)
  ⇨ environ la moitié des précipitations
  ⇨ environ 300 à 400 mm d'évaporation
- à l'échelle annuelle : 5 à 10 % de ruissellement, 90 à 95 % d'écoulement de nappe
- à l'échelle d'une crue : 10 à 30 % de ruissellement, 70 à 90 % d'écoulement de nappe

Bassin versant de la Fontaine du Theil (35)
ARVALIS-UIPP © geoportail.gouv.fr

Différents types d'écoulements

Quelques ordres de grandeur : en contexte de limons battants en zones karstique (Haute Normandie, BV de 1045 ha)

- Pluviométrie moyenne annuelle : 820 mm
- Evaporation : 350-400 mm
- Infiltration profonde moyenne : 300-400 mm
- A l'échelle annuelle, lame ruisselée moyenne : 8.0 mm (variabilité de 3 à 13 mm) dont 89% en Automne-**Hiver**

Bassin versant de Bourville. Haute Normandie © Areas

A l'échelle de l'événement :

Nombre crues / campagne	Lame ruisselée	% de la lame ruisselée annuelle
94 %	0.02 à 1 mm	35 %
2	1 à 3 mm	17 %
1	> 3 mm	37 %

Quels écoulements pour quels contaminants ?

Quatre types de transfert hydrique, qui ne concernent pas chacun tous les contaminants

	Nitrates	MES (+ MO, phosphore, pesticides adsorbés…)	Pesticides en solution
Ruissellement		X	X
Drainage	X	X	X
Ecoulements hypodermiques	X		X
Infiltration diffuse	X		X

Différence de comportement de la substance, selon sa solubilité et son affinité pour les particules de sol.

Focus sur l'azote

Focus sur l'azote

L'azote dans les eaux se trouve sous 2 formes

- azote organique
- azote minéral dont ammonium (NH_4), nitrite (NO_2) et nitrate (NO_3)

Apport en nitrate > Consommation des cultures, si excès ⇨ Déséquilibre

☞ Les nitrates sont en partie responsables de l'eutrophisation des milieux aquatiques de surface

Forme de l'azote à l'origine de la pollution diffuse

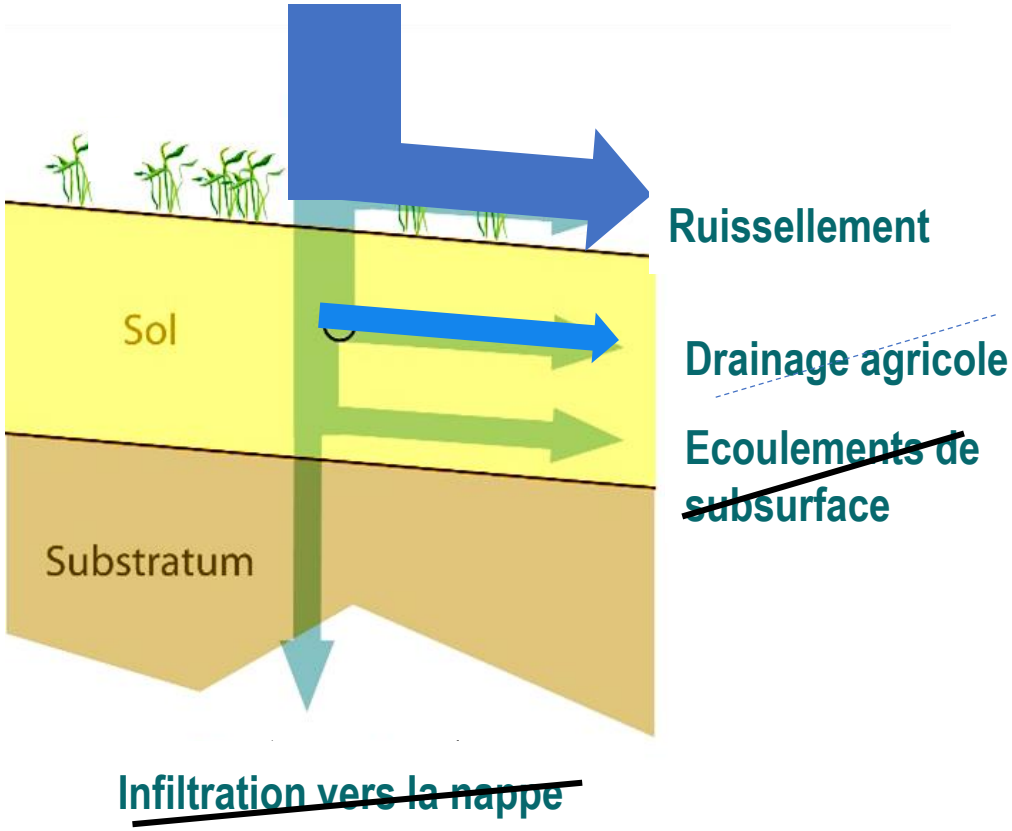
- 90% des flux d'azote annuels sont sous forme nitrate
- présence d'azote ammoniacal et d'azote organique ⇨ rejets « frais » (effluents domestiques, élevage ou industrie agroalimentaire)

		Milieux naturels (mg/L) (Meybeck, 1982)	Milieux anthropisés (mg/L) (Omernik, 1977)
Nitrate	NO_3^-	0.1	25 (9 – 100)
Ammonium	NH_4^-	0.03	0.1
Nitrite	NO_2^-	ε	ε + pics
Azote organique dissous	DON	0.26	0.2 – 6
Azote organique particulaire	PON	55% of TN	-

Focus sur l'érosion, le transfert de Matières en Suspension

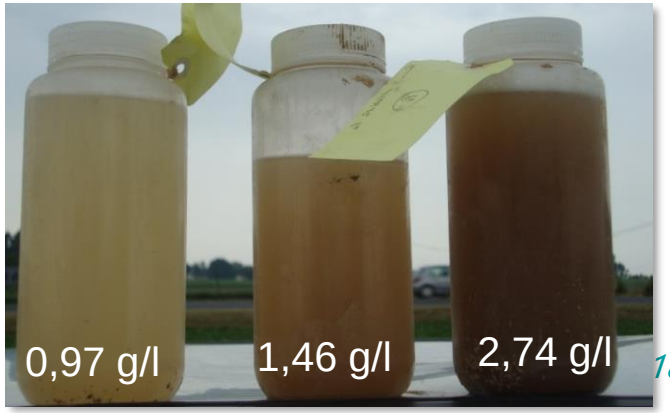
Focus sur l'érosion

Le ruissellement (principal mode de transfert des MES)



- ⇨ Transport en suspension
- ⇨ Arrachage de particules

Ouvry JF., © AREAS



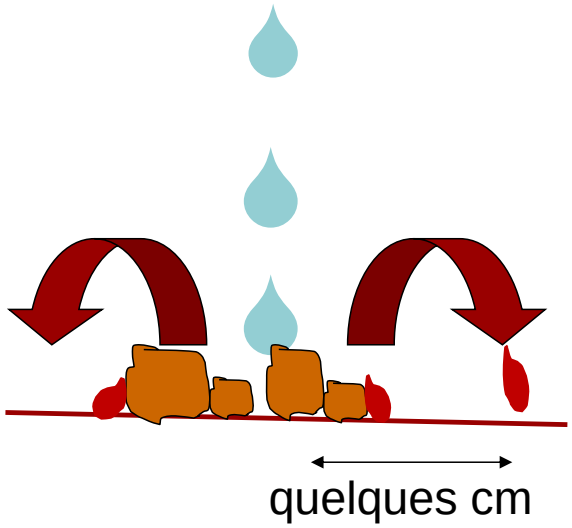
Focus sur l'érosion

Les MES sont issues de l'érosion de sols en 3 phases :

Arrachement – Transport - Dépôt

Arrachement ⇨ 2 processus en jeu :

- Impact des gouttes de pluie sur agrégats de terre : effet splash
  - Effet des chocs des gouttes de pluie sur des agrégats saturés



- Ecoulement de l'eau, qui arrache le fond du lit d'écoulement
  - Vitesse de l'écoulement Ve > Vitesse critique Vc (Vc : résistance du sol à l'arrachement)
  - Les caractéristiques des écoulements influencent la granulométrie des MES

Ouvry JF., © AREAS

Focus sur l'érosion

Transport : Ruissellement diffus ou concentré

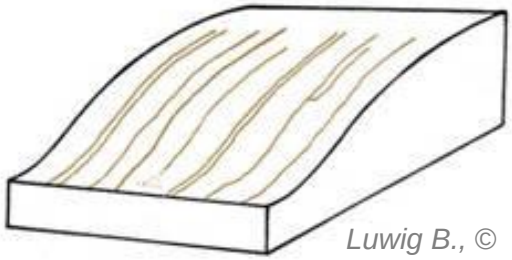
Ruissellement diffus

- concerne toute la surface de la parcelle
- peut lessiver et emporter tout ce qui est en surface des sols
- vitesse faible : peu d'éléments grossiers

Ruissellement concentré

- versants (rigoles)
- talwegs
- peut emporter tout ce qui est contenu dans le volume de sol érodé

Forme en parallèle sur versant.
Parcelle

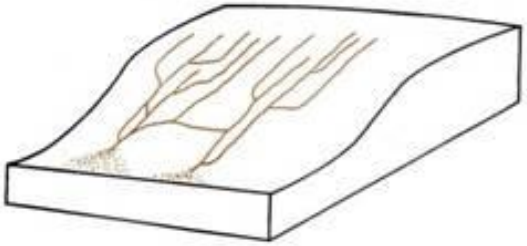


Luwig B., ©

Forme linéaire dans talweg
Parcelle et BV

Ouvry JF., © AREAS

Forme en chevelu sur versant
Parcelle



Focus sur l'érosion

Si la surface augmente alors le volume total ruisselé et le débit augmentent

⇨ l'érosion croît sur sols cultivés, par ruissellement concentré dans les talwegs

Mais en même temps, **les dépôts** se forment sur le chemin de l'eau

Le long de l'axe de ruissellement concentré, il y a des phases de dépôt et d'arrachement

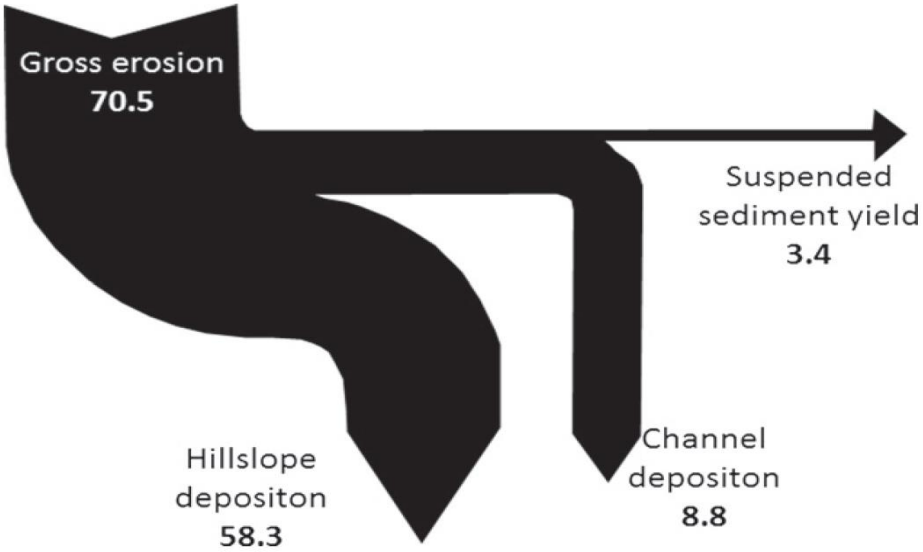


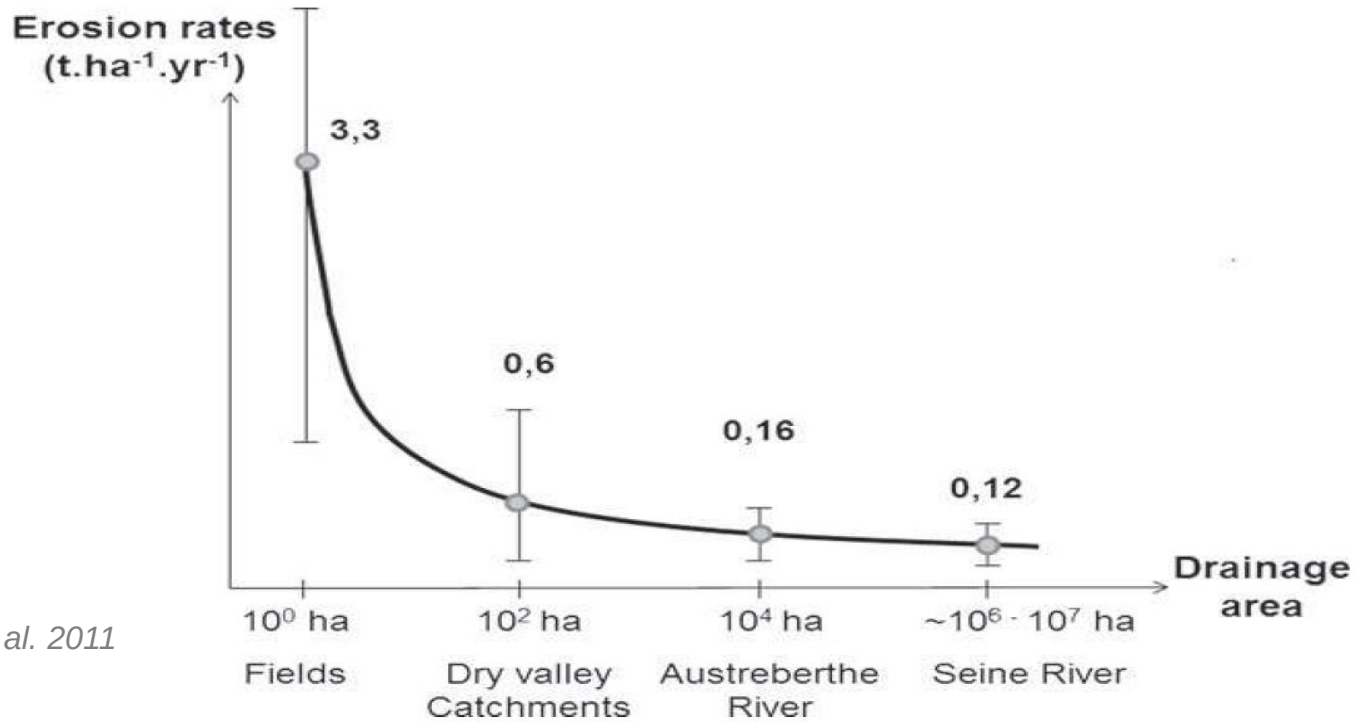
Fig. 11. The sediment budget estimated for the Austreberthe river basin, in kt yr^{-1}.

Delmas et al. 2011

Focus sur l'érosion

Plus on est à proximité des sources de MES = parcelle

- ⇨ plus les concentrations sont élevées
- ⇨ plus les quantités de MES par ha sont fortes
- ⇨ plus la proportion de particules grossières est forte



Delmas et al. 2011

Fig. 10. Scale effect on erosion rates from the Austreberthe fields to the Seine river.

Focus sur l'érosion

Facteurs influençant soit l'érosion, soit la sédimentation et l'infiltration :

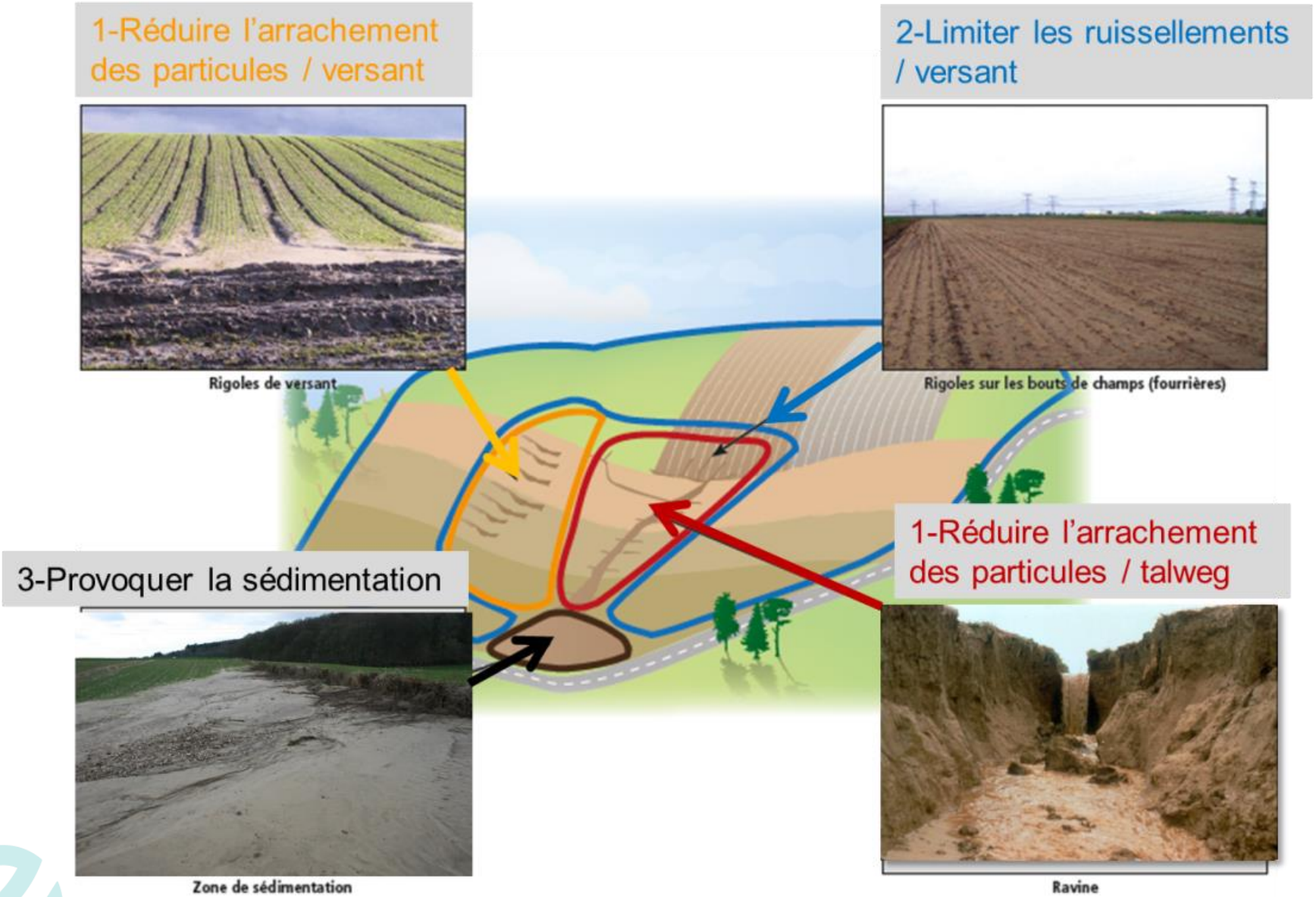
- Répartition des surfaces en prairies au sein du BV par rapport aux chemins de l'eau
- Taille des parcelles
- Position de l'accès aux parcelles
- Sens de travail du sol par rapport à la pente

Les transferts de MES par ruissellement sont d'autant plus importants que :

- pluies intenses et/ou longues et fréquentes
- sols de faible capacité d'infiltration (battant, hydromorphe et peu couvert)
- terres pentues et érodables (texture et pratiques culturales)
- présence d'un réseau permettant à l'écoulement d'atteindre le milieu aquatique

Focus sur l'érosion

Bilan en terme de leviers : 3 niveaux d'action



Focus sur le Phosphore

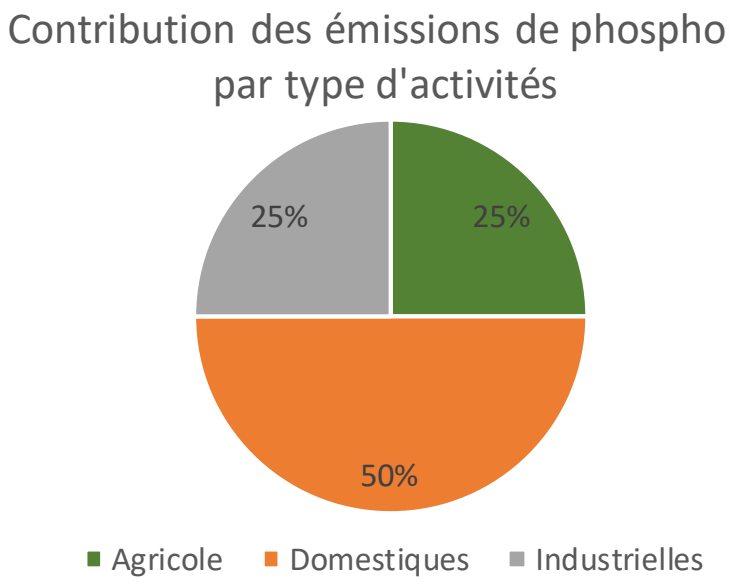
Focus sur le phosphore

Présence de phosphore normale dans l'eau (quelques µg/l)

Valeurs couramment observées :

- 1 - 20 µg/l (milieux « naturels », eau calme)
- 10 - 100 µg/l (zones agricoles peu intensives à intensives)
- > 0,1 mg/l (cours d'eau en crue) jusqu'à 10 mg/l
- > 0,1 mg/l (rejets d'effluents)

Les émissions de phosphore dans les eaux ne dépendent pas que de l'activité agricole



Tournebize J., © Irstea

⇨ facteur de maîtrise de l'eutrophisation pour les eaux douces continentales

Dumont B., © Irstea

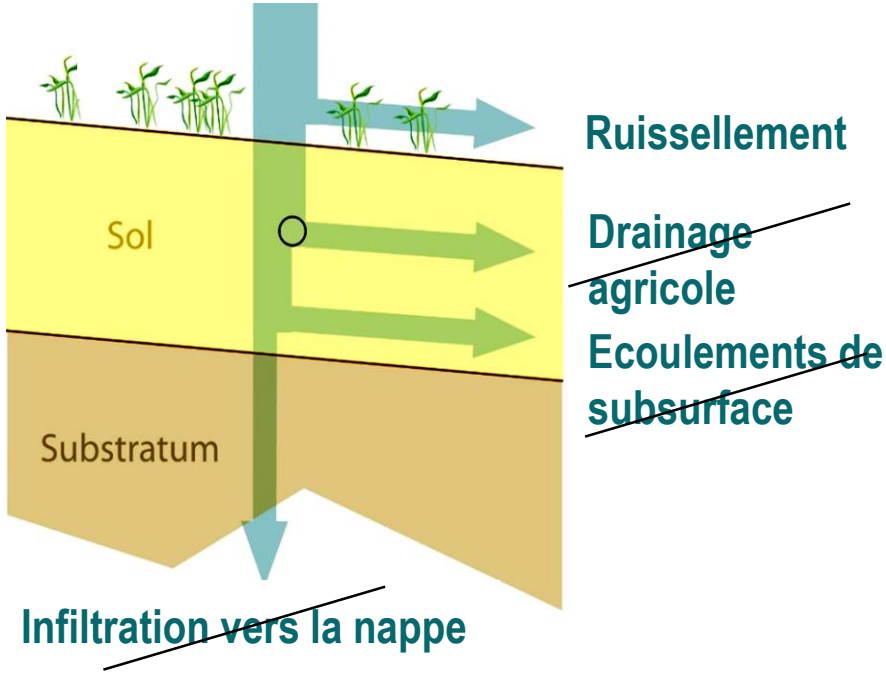
Focus sur le phosphore

Le phosphore s'exporte sous forme :

- dissoute (orthophosphate PO_4^-)
- particulaire (lié aux particules de MES)

Phosphore total ⇨ essentiellement transféré sous forme particulaire

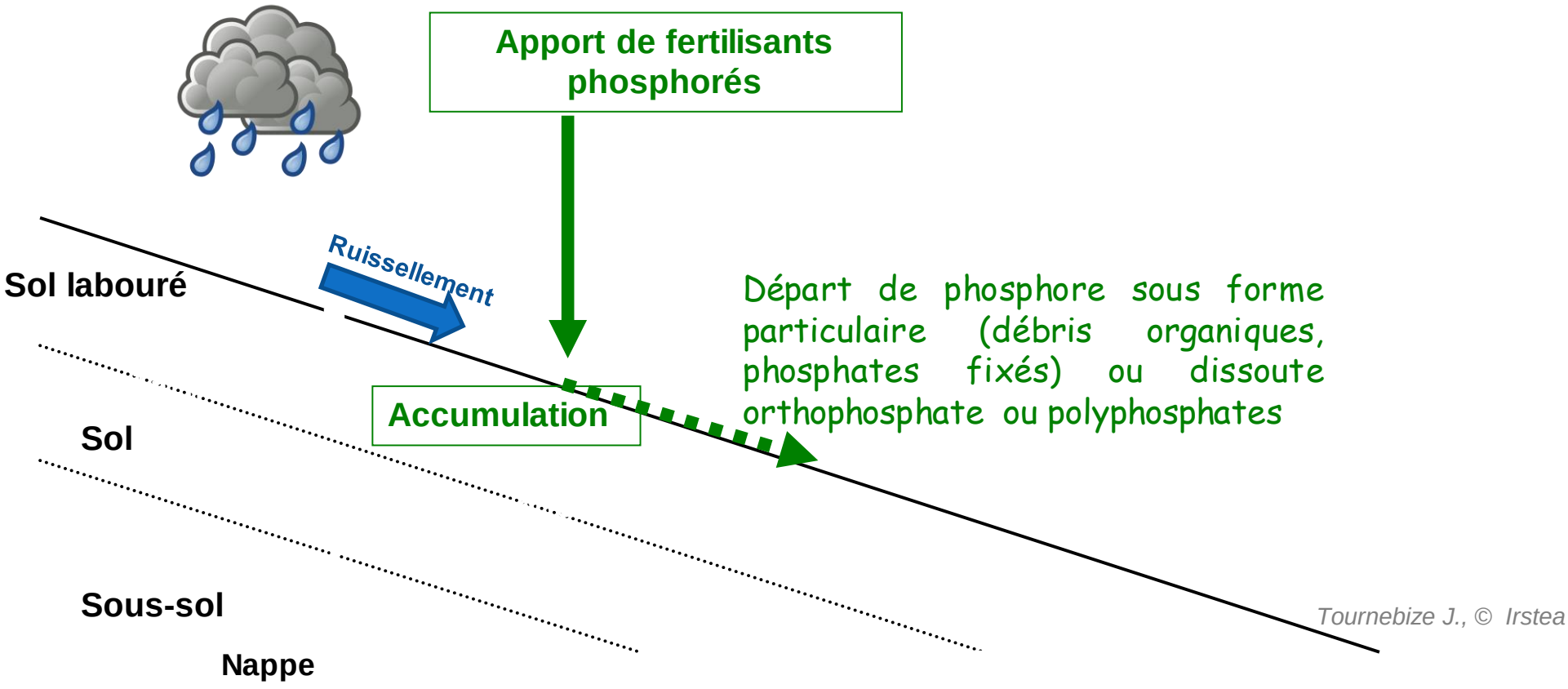
Les exportations sont fortement liées à la dynamique érosive de la parcelle



Focus sur le phosphore

Facteurs d'influence

- Plus le ruissellement, l'érosion diffuse et les MES augmentent et plus les transferts de phosphore croissent.
- Apport de phosphore en surface (fumier, lisier, etc.) ⇨ transferts élevés



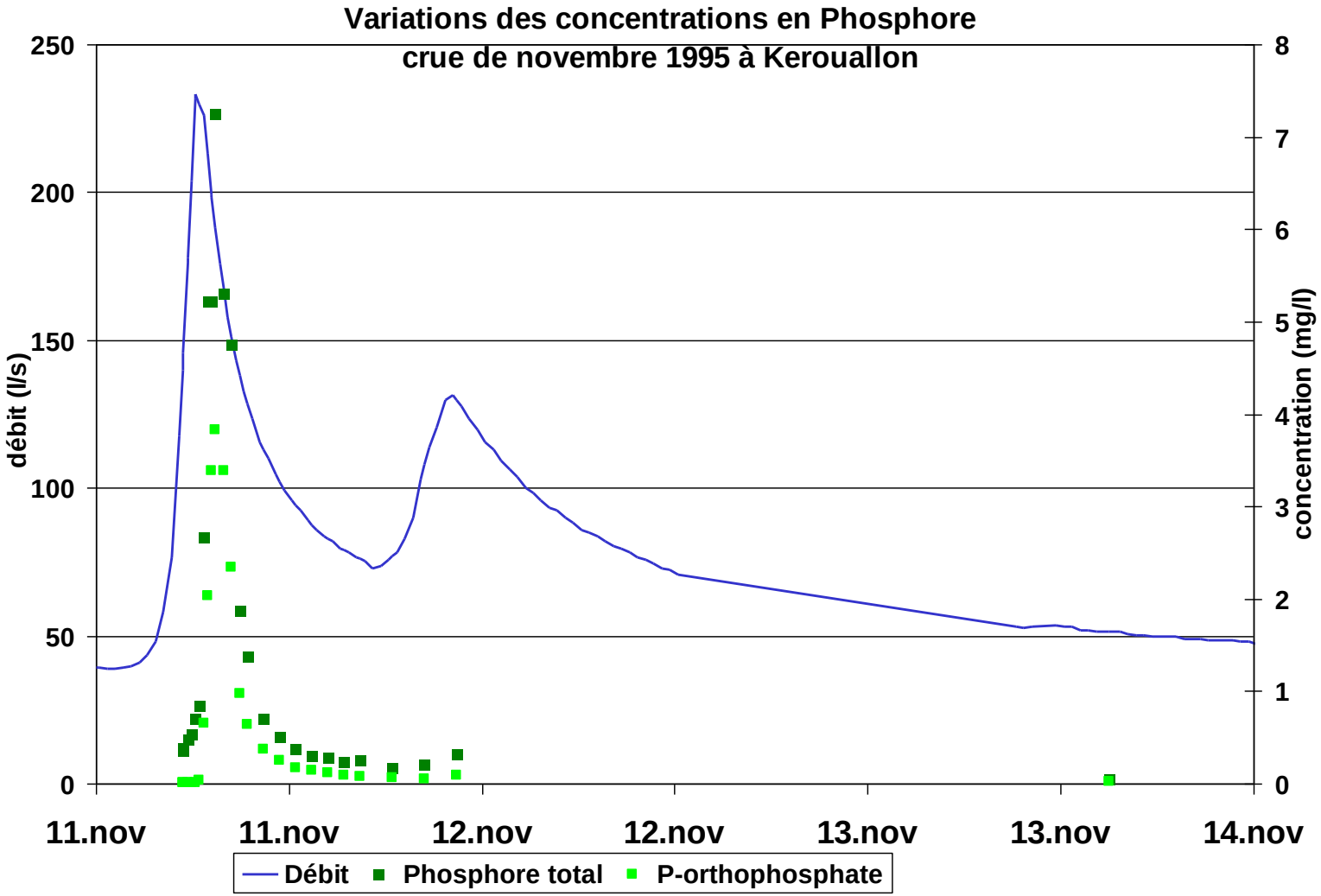
Tournebize J., © Irstea

Focus sur le phosphore

Dynamique de transfert

Processus d'entraînement (augmentation de la concentration concomitante à l'augmentation des débits)

Le transfert a lieu principalement pendant les épisodes ruisselants



Focus sur le phosphore

Effets d'échelle

A mesure que le BV croit, la proportion de phosphore total par rapport aux MES devient plus importante.

Une partie du phosphore particulaire peut sédimenter mais le phosphore dissous reste présent dans le ruissellement

Ouvry JF., © AREAS

Focus sur les pesticides

Focus sur les pesticides

Origine de la contamination par les produits phytosanitaires

Au moment de la manipulation

- préparation de la bouillie
- élimination du fond de cuve
- rinçage du matériel
- produits non utilisés
- application : dérive de pulvérisation

> pollution ponctuelle
> ≈ maîtrisable

Après la manipulation

- entraînement par volatilisation
- entraînement au cours d'une pluie

> pollution diffuse
> plus difficile à
> maîtriser

Focus sur les pesticides

Les produits phytosanitaires

Large famille de molécules aux caractéristiques variées :

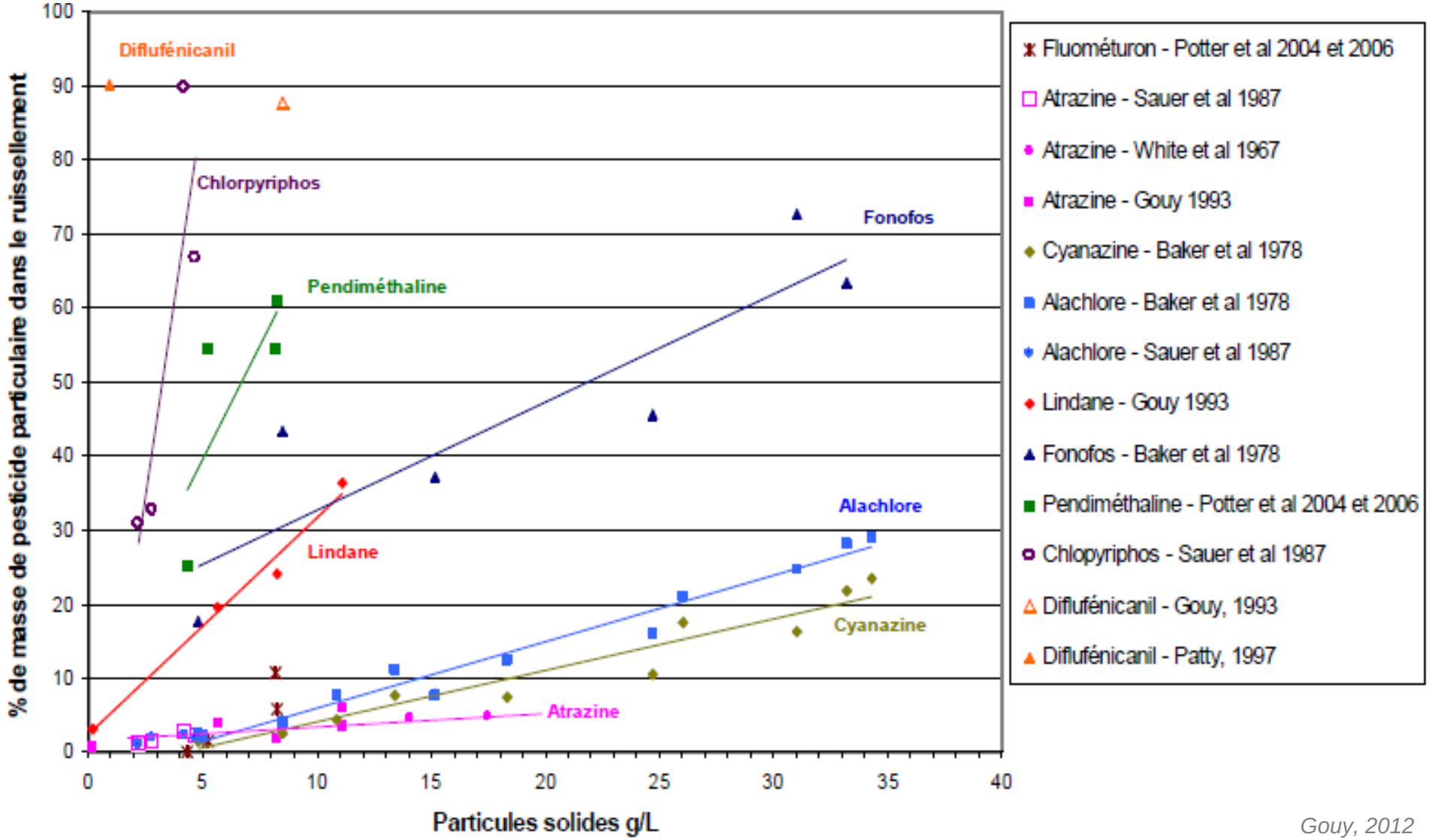
- solubilité et mobilité (Koc)
- durée de vie (demie vie = DT50)
- dose et modalités d'application
- la formulation

Sensibilité aux écoulements différente selon le Koc

- fraction en solution : sensible à **tous les types de transfert**
- fraction adsorbée sur les particules de sol : sensible au **ruissellement** (érosif)

Focus sur les pesticides

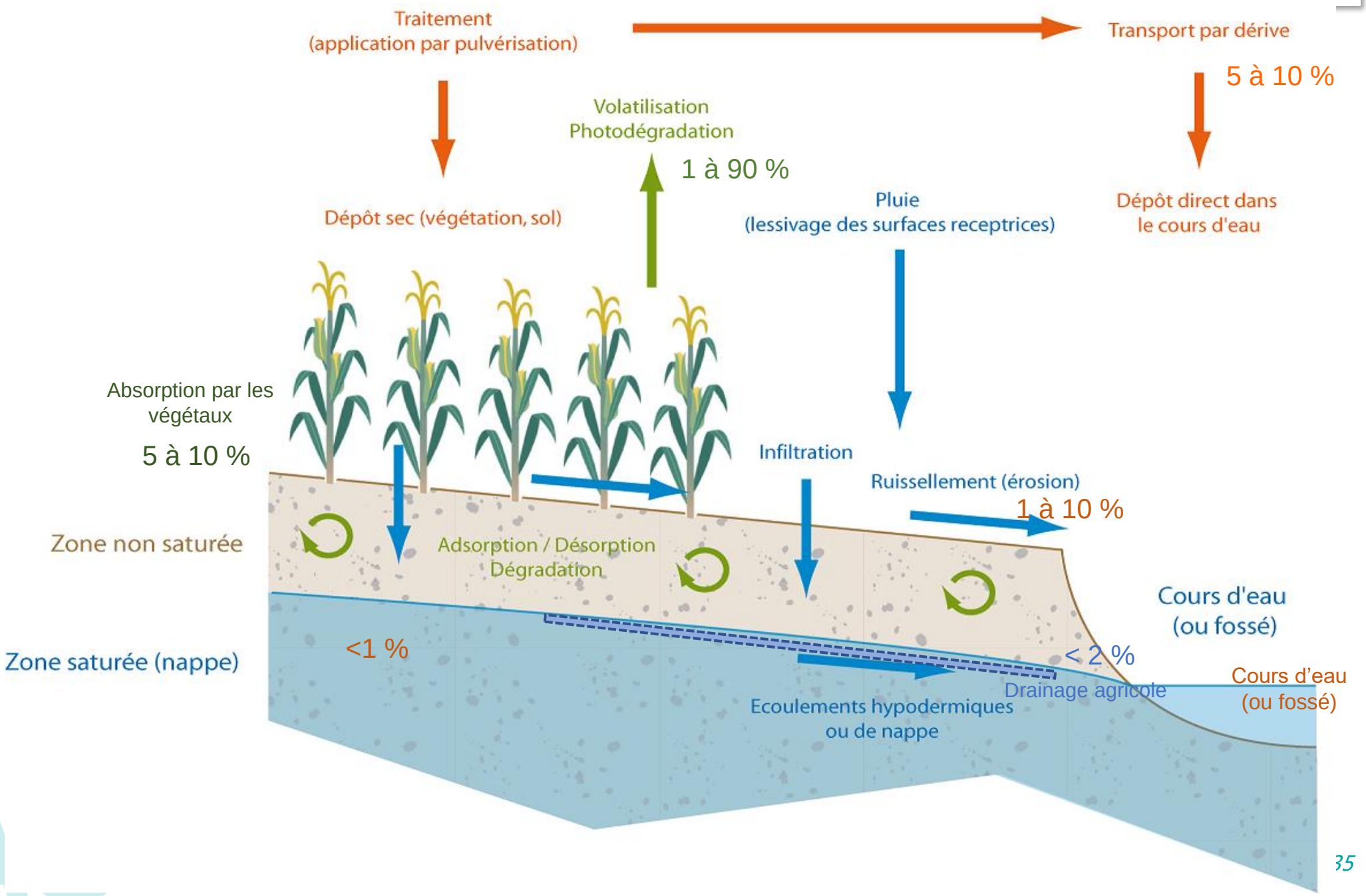
☞ En général, transfert sous forme soluble majoritaire
sauf écoulements très chargés en MES et/ou substances très adsorbées



Gouy, 2012

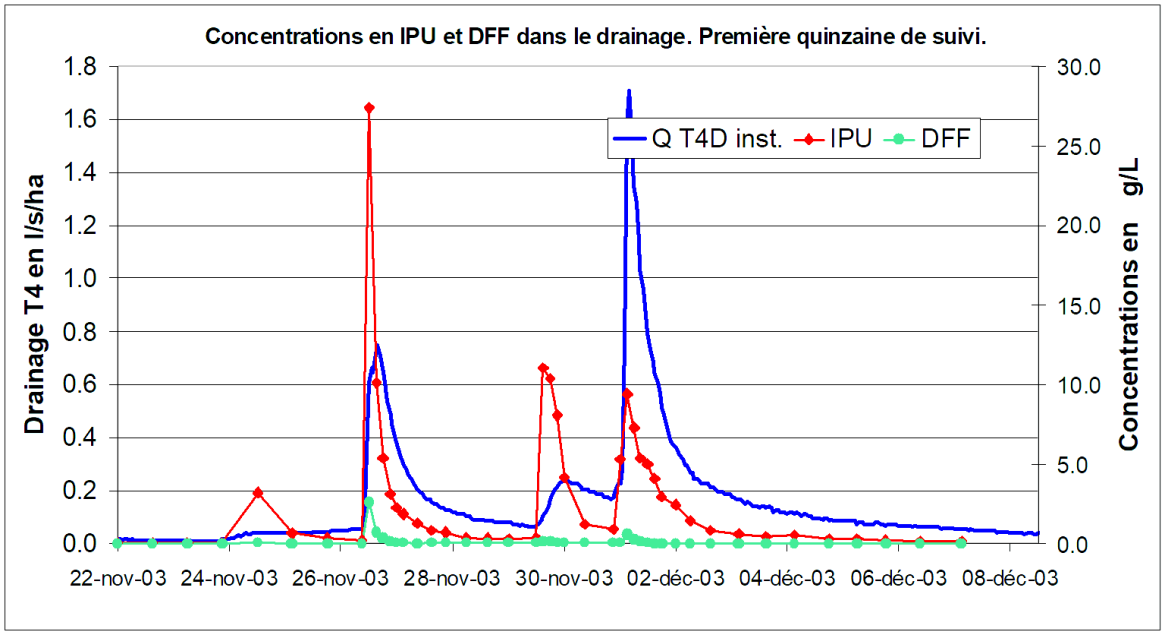
Focus sur les pesticides

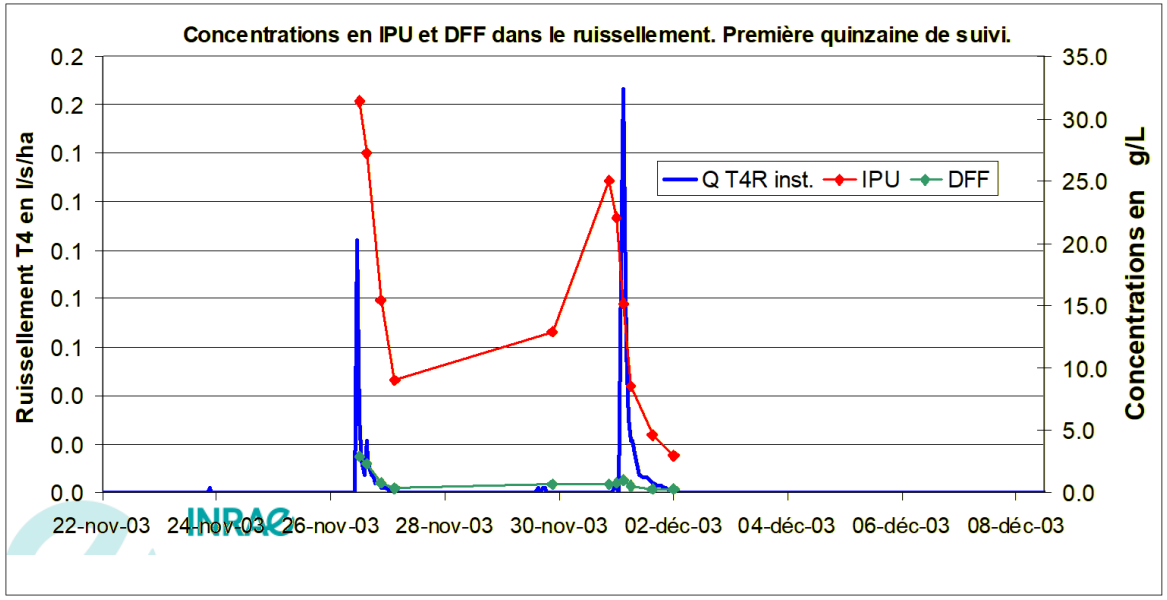
Quelques ordres de grandeur



Focus sur les pesticides

Dynamique des transferts à l'échelle de la parcelle





Importance :

- de la première pluie suivant l'application
- du coefficient d'adsorption
- de la demi-vie
- de l'état hydrique du sol au moment de l'application

Dose IPU = 5*dose DFF

Site expérimental de la Jaillière (ARVALIS-Institut du végétal)

Focus sur les pesticides

Effet d'échelle

Site / substance	BV Hydrologie	Pertes parcellaires	Pertes au BV	Référence
BV viticole méditerranéen Diuron	91 ha transferts rapides avec ré-infiltration dans les fossés	Par ruissellement hortonien de 1,3 à 4,8 % Cmax 700 µg/L	0,50 % Cmax 500 µg/L	Bilan 97 Louchart, 1999
BV en plateau crayeux à couverture limoneuse grandes cultures, bois, prairies	90 à 1070 ha substrat karstique à processus de réinfiltration important	Par ruissellement hortonien 0,1 à 4,8% Cmax 340 µg/L	de 0 à 0,002% Cmax : 12 µg/L	Bilans 97-98 Lecomte, 1999
grandes cultures, bois, prairies Atrazine Métolachlore	drainage agricole et ruissellement sur sol saturé sans effet tampon de nappe	de 1,2 à 1,8 % Cmax : 53 µg/L		-92 1995
BV viticole alsacien à sols bruns calcaire loessique plus ou moins profond Glyphosate	40 ha BV « sec » écoulement en période de crue ruissellement <2%	Par ruissellement hortonien de 0,04 à 0,27% Cmax > 1000µg/L	0,09% Cmax 70 µg/L	Bilan 2004 Domange, 2005

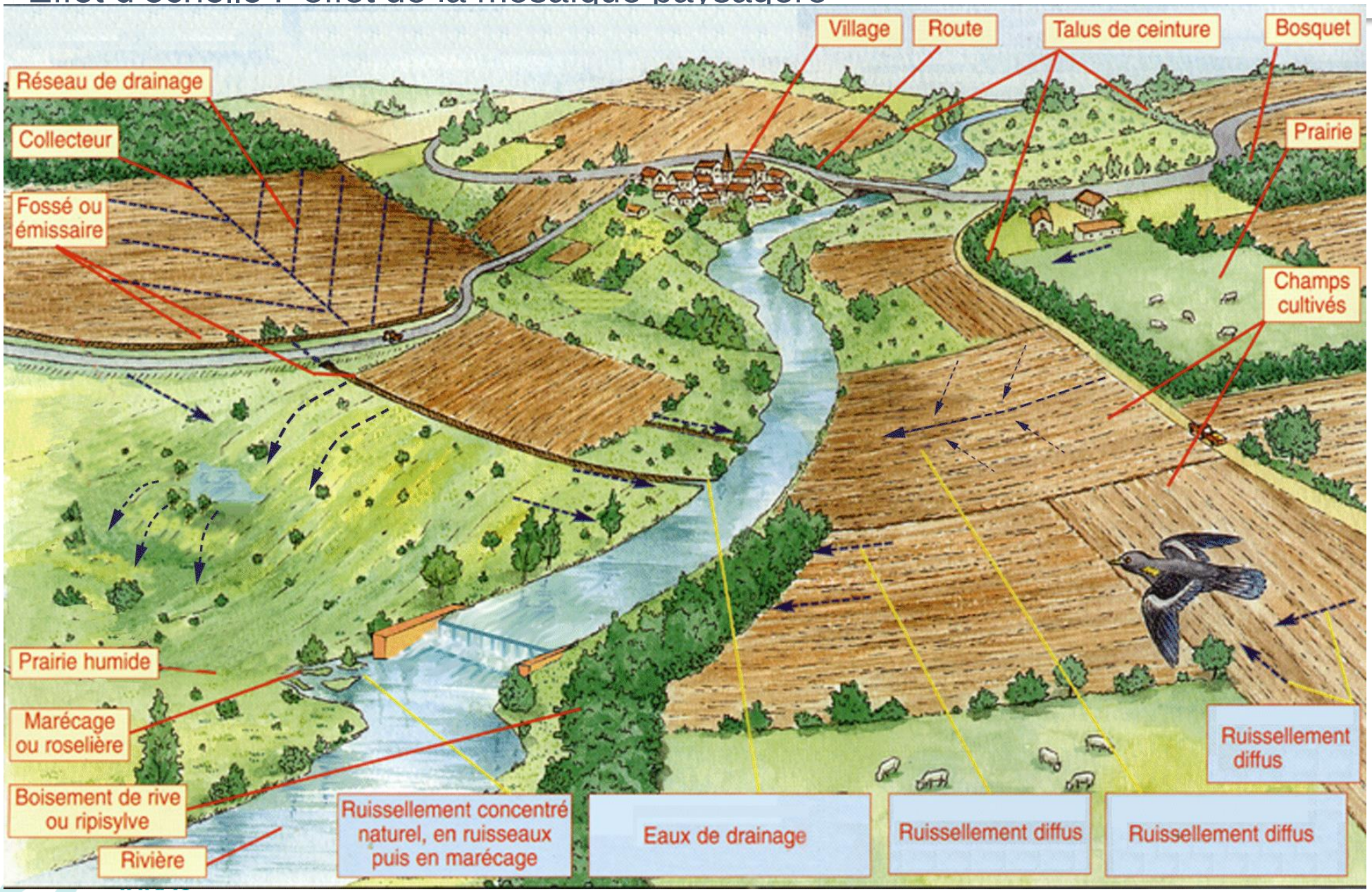
⇒ **Taux de transfert < 5% à la parcelle et 0,5% au BV**

⇒ ***Facteurs d'atténuation des flux « parcelle → BV » de 3 à 2000***

⇒ ***Facteurs d'atténuation des concentrations de 1,5 à 180***

Focus sur les pesticides

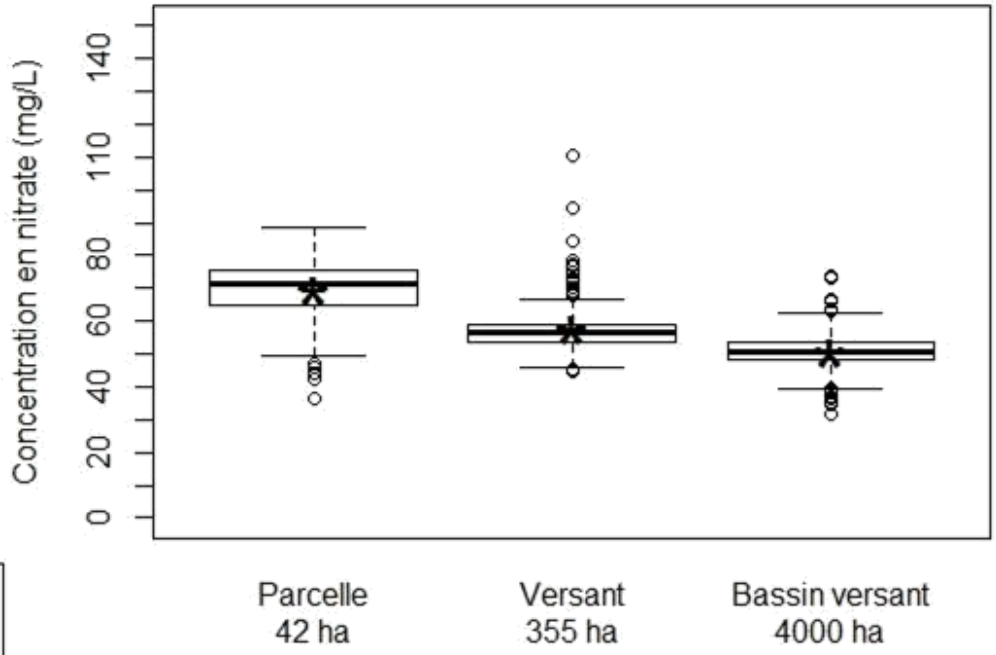
Effet d'échelle : ¨effet de la mosaïque paysagère

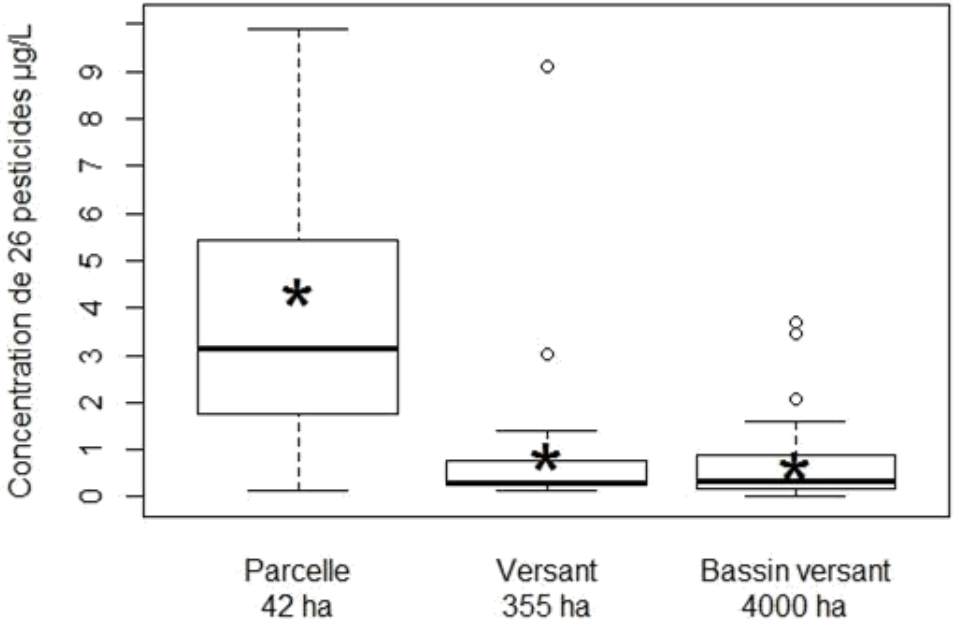


Focus sur les pesticides

Effet d'échelle dans le transfert de nitrate et produits phytosanitaires

NITRATE →
Invariance de l'échelle
Toutes les parcelles contribuent au signal nitrate





← PESTICIDES
Dépendance d'échelle
Fortes concentrations à l'échelle de la parcelle

Focus sur les pesticides

Type de transfert pour les pesticides

Transferts par ruissellement, infiltration, écoulement latéral

- écoulements rapides de surface / sub-surface ⇨ pics de concentration
- écoulements lents dans le sol / nappe ⇨ niveaux de base (et produits de dégradation)

Intérêt d'agir sur :

- le ruissellement
- les écoulements rapides

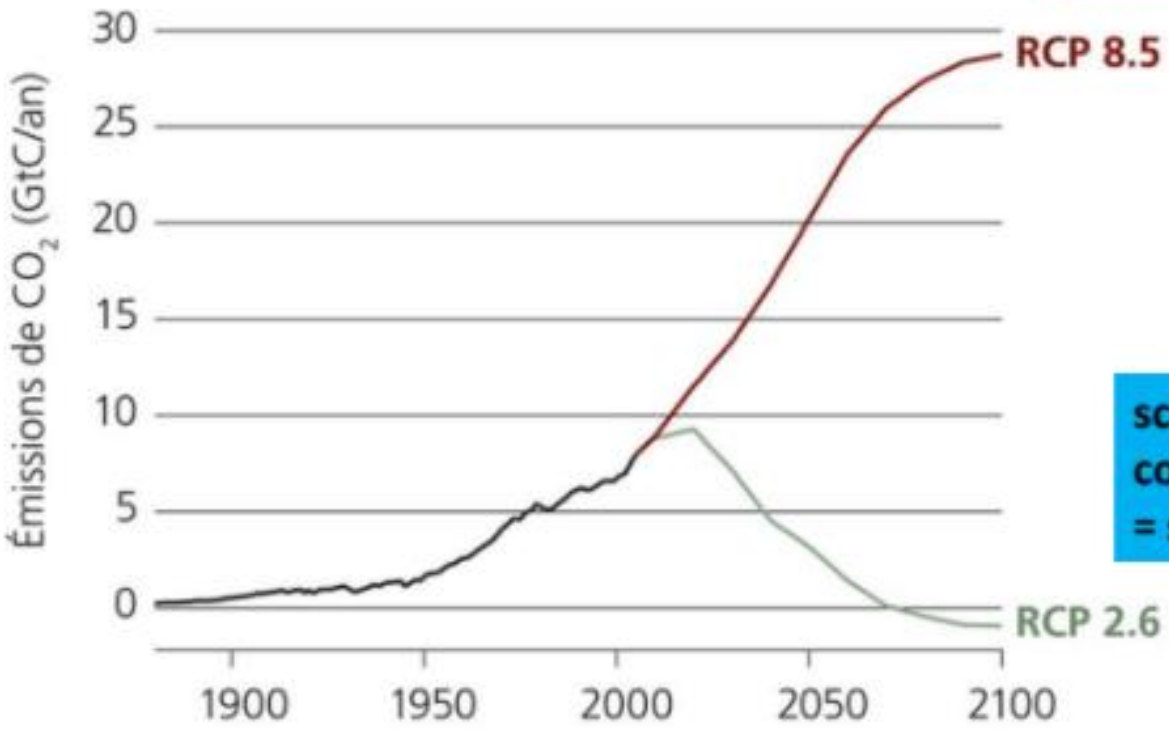
⇨ en vue de limiter les pics de pollution

⇨ Pour limiter les flux de substances dissoutes, pas seulement le transport particulaire

Quels effets attendus du changement climatique sur le ruissellement ?

Scénario tendanciel : concentration en CO2 >1000 ppm = scénario catastrophe

~+4.5° en France
▯ +9° en Juillet



scénario à 2°:
concentration en CO2 400 ppm
= scénario combatif

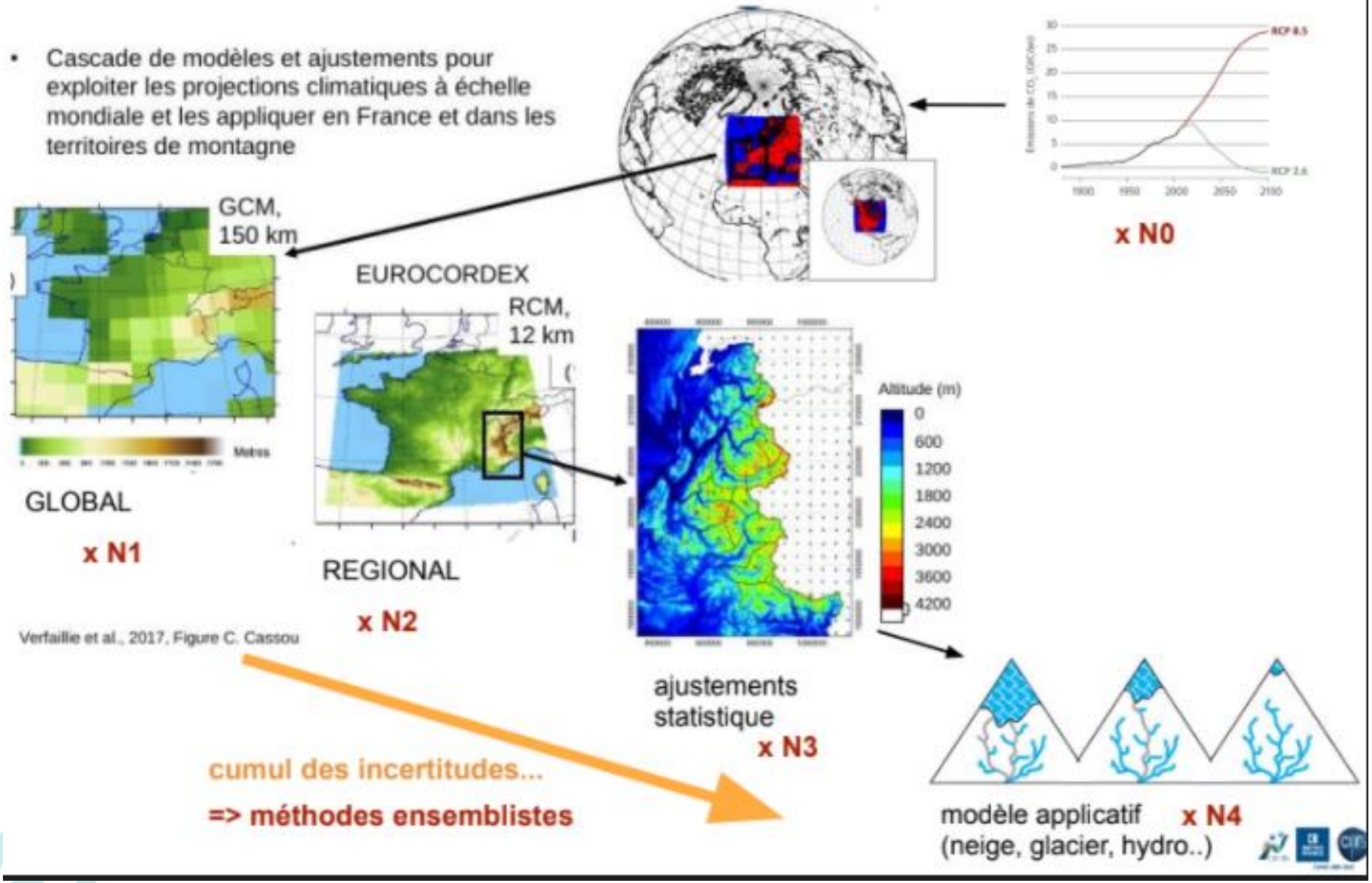
~+2.7° en France

Planton et al. 2014 **cité par Florence Habets, 2021**

Quels effets attendus du changement climatique sur le ruissellement ?

Déclinaison locale des projections : chaînes de modélisation

- Cascade de modèles et ajustements pour exploiter les projections climatiques à échelle mondiale et les appliquer en France et dans les territoires de montagne



Verfaille et al., 2017, Figure C. Cassou

cumul des incertitudes...

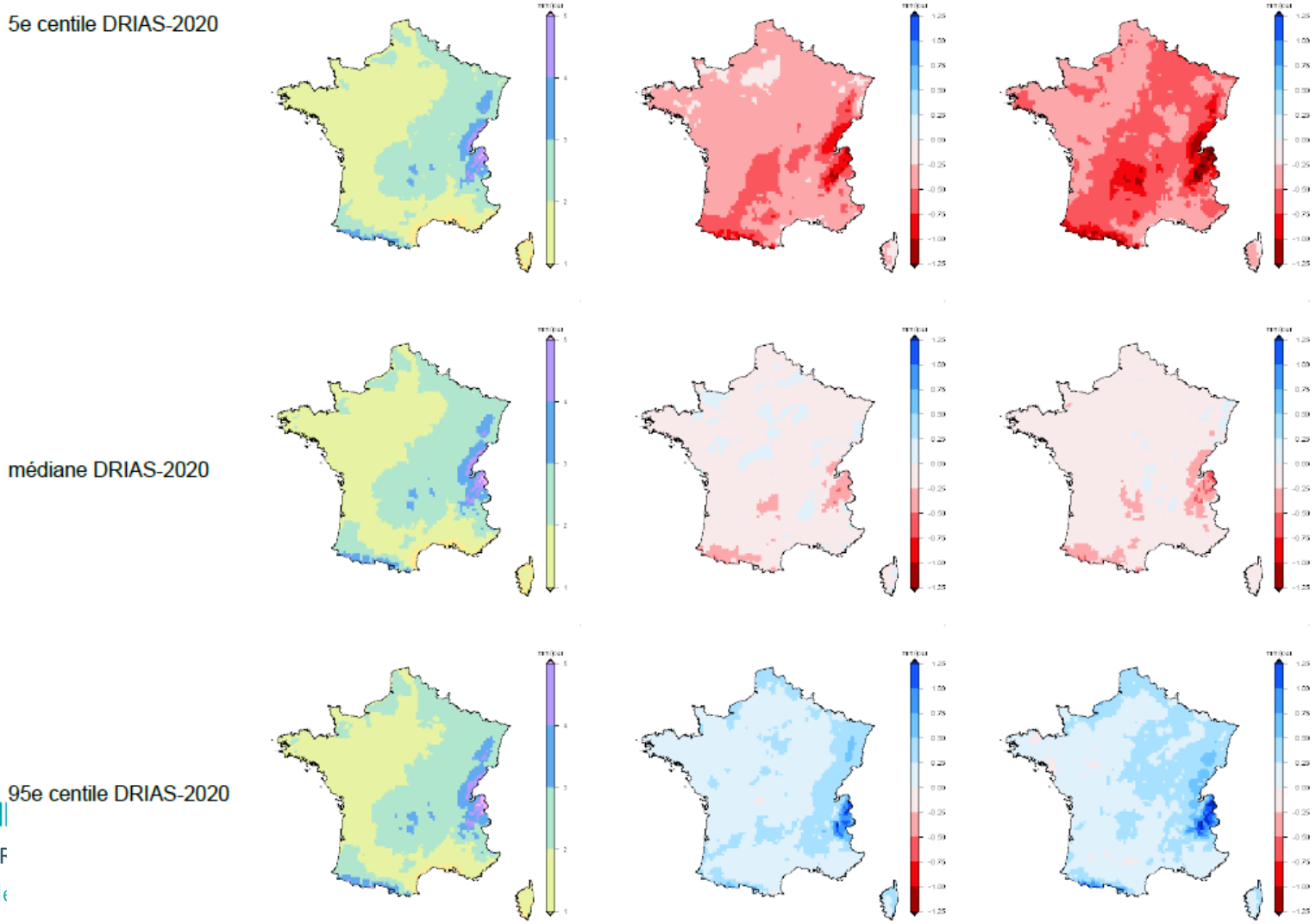
=> méthodes ensemblistes

D'après Florence Habets, 2021

Quels effets attendus du changement climatique sur le ruissellement ?

Projections climatiques pour un scénario d'émissions moyen (RCP 4.5)
Portail DRIAS, les futurs du climat : http://www.drias-climat.fr/

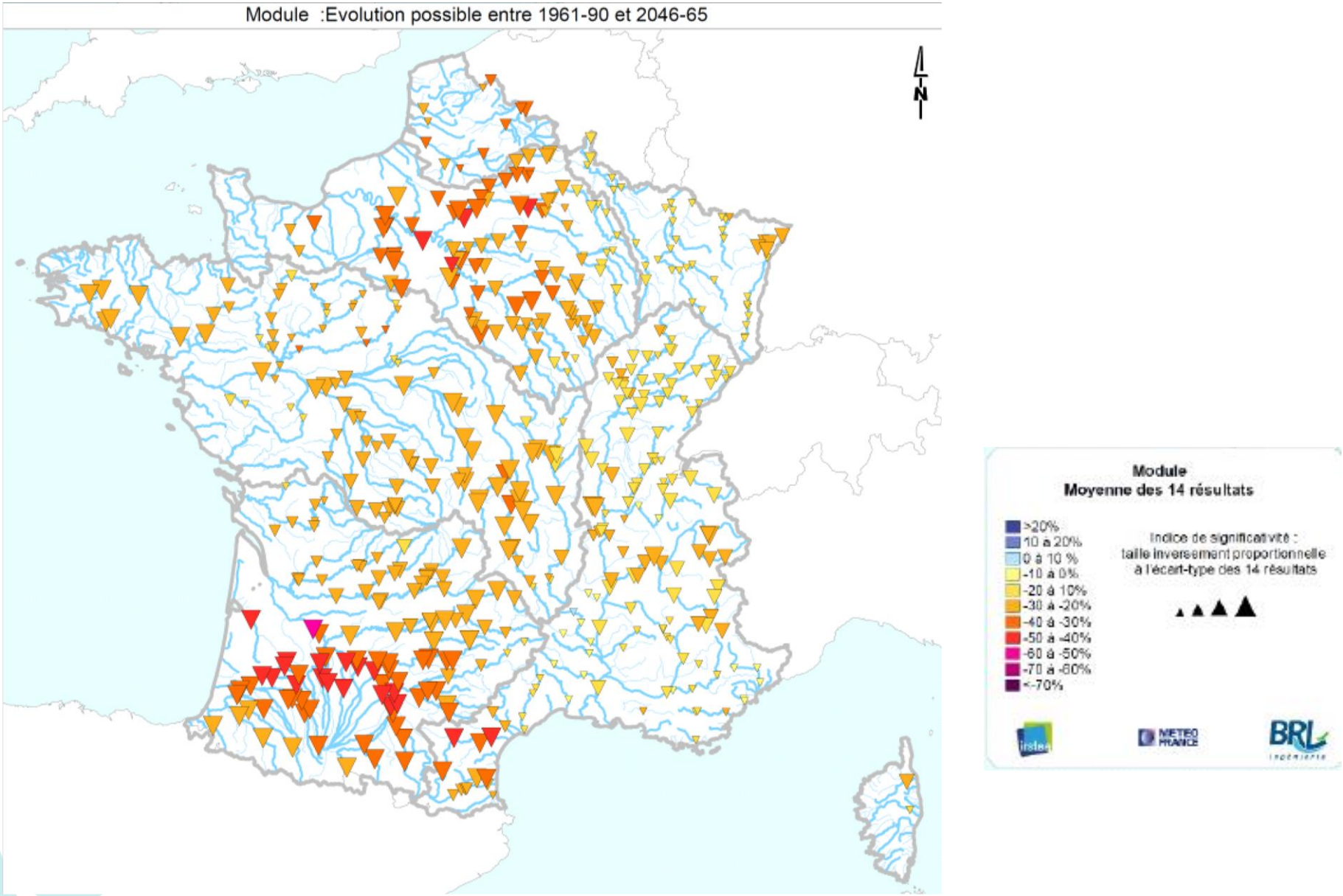
Moyennes estivales des températures



Quels effets attendus du changement climatique sur le ruissellement ?

Projet Explore 2070 (2010-2012). Quelle baisse possible des débits moyens ?

Baisse générale des débits annuels



Quels effets attendus du changement climatique sur le ruissellement ?

Résultats d'Explore 2070 en métropole :

- augmentation des températures moyennes de l'air de +1.4° C à +3° C
- évolution incertaine des précipitations, avec cependant un accord sur une tendance à la baisse des

Modélisation de l'évolution des régimes hydrologiques en cours (projet Explore 2)

- diminution très significative générale des débits d'étiage (encore plus prononcée que la diminution à l'échelle annuelle)

A priori, multiplication des phénomènes extrêmes :

- Pluies intenses :
  - Augmentation du ruissellement hortonien, de la capacité érosive des pluies, des processus d'érosion, destruction des agrégats de sol
  - Diminution de l'infiltration, du remplissage de la RU et de la recherche de la nappe
- Sècheresses intenses :
  - Déstructuration des agrégats de sol

Le changement climatique accroit le besoin de préserver les sols (couvert, structure) et leur capacité d'infiltration

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

OFB
OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre

Merci de votre attention.