



HAL
open science

Cours de Matériaux du Génie civil à destination de la première année DUT GCCD

David Amitrano, Pierre Billet, Laura Pasquier

► **To cite this version:**

David Amitrano, Pierre Billet, Laura Pasquier. Cours de Matériaux du Génie civil à destination de la première année DUT GCCD. Licence. France. 2020. <hal-03273215>

HAL Id: hal-03273215

<https://hal.science/hal-03273215v1>

Submitted on 29 Jun 2021

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.



HAL Authorization

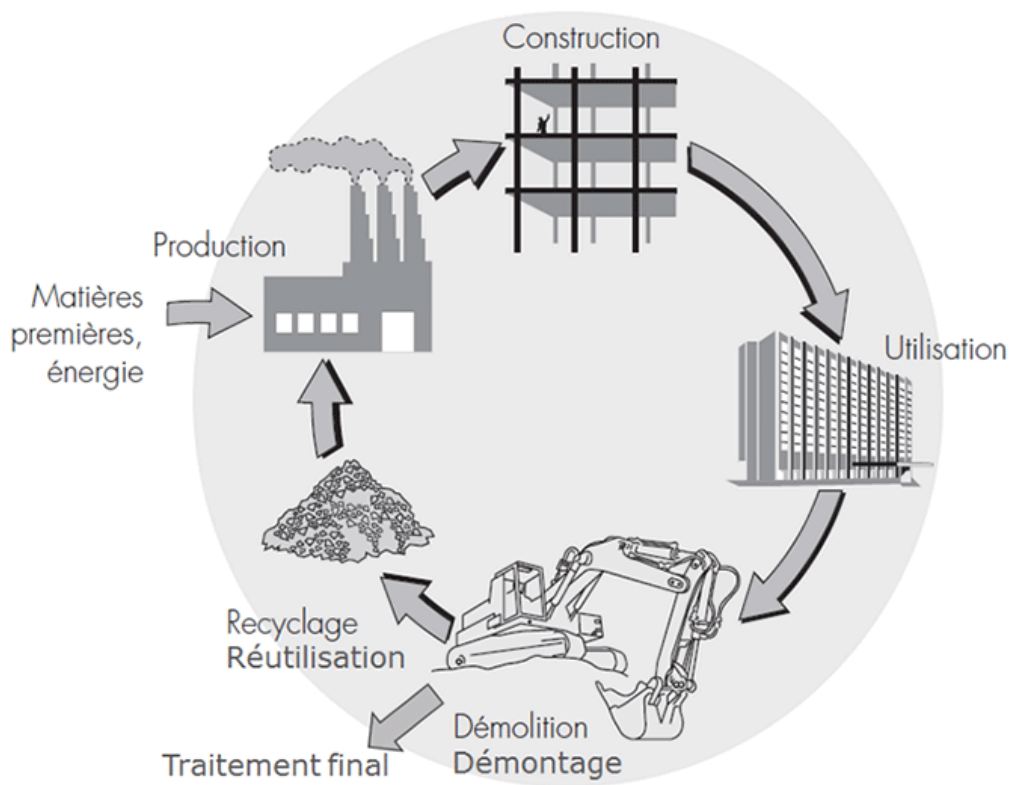
Université Grenoble Alpes
Institut Universitaire de Technologie I

Département Génie Civil et Construction Durable

1^{ère} année

Module MXG1

Connaissance des matériaux



Support de Cours

David Amitrano
Pierre Billet
Laura Pasquier

Edition 2020-2021

Objectifs :

L'objectif de ce module est de vous permettre de :

- Appréhender le contexte géologique dans le domaine du génie civil
- Donner les principales caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux de construction en relation avec leur utilisation
- Introduire les notions d'analyse de cycle de vie, les fiches de déclarations environnementales et sanitaires (FDES), les éco matériaux

Il s'agit d'un module de base qui vous servira tout au long de votre formation en génie civil et construction durable.

Compétences visées :

A l'issue de ce module vous devrez être capable de :

- Collecter les données géologiques, les représenter sur une carte
- Décrire les principaux matériaux de construction et leurs utilisations
- Décrire, calculer et mesurer les caractéristiques des principaux matériaux
- Gérer des fiches FDES et analyser le cycle de vie d'un matériau

Organisation : Ce module est découpé en deux grandes parties :

- Géologie générale, formations superficielles, cartographie (2 polys spécifiques)
1 cours de 2 heures, 3 TD de 2 heures, cette partie sera réalisé dans le module MXG2
- Matériaux du Génie Civil (ce document)
4 séances de cours de 2 heures, 4 séances de travaux dirigés de 2 heures et 3 séances de travaux pratiques de 3 heures

Contenu

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Géologie Générale, Formations superficielles et Cartographie | 4 |
| 2 | Principaux matériaux de construction et leurs utilisations | 5 |
| 3 | Caractéristiques des principaux matériaux : | 6 |
| 3.1 | Paramètres de définition et de classement | 6 |
| 3.2 | Propriétés physiques..... | 7 |
| 3.3 | Mesures, incertitudes, variabilité et dispersion..... | 9 |
| 3.3.1 | Mesures et Incertitudes | 9 |
| 3.3.2 | Variabilité, dispersion, moyenne et écart type..... | 10 |
| 3.4 | Comportement mécanique et rhéologique | 13 |
| 3.4.1 | Propriétés mécaniques de base | 13 |
| 3.4.2 | Comportements mécaniques de base | 15 |
| 3.4.3 | Essais mécaniques standards | 17 |
| 3.4.4 | Comportements observés expérimentalement..... | 18 |
| 3.5 | Propriétés thermiques, acoustiques, électriques | 20 |
| 3.6 | Durabilité, altération, corrosion..... | 21 |
| 4 | Impact environnemental et Analyse de Cycle de Vie | 22 |
| 4.1 | Impact et performance environnementale | 22 |
| 4.2 | Analyse de Cycle de Vie - ACV..... | 23 |
| 4.3 | Fiches de déclarations environnementales et sanitaires (FDES). | 26 |
| 4.4 | Comparaison de plusieurs solutions à partir de FDES. | 27 |

1 Géologie Générale, Formations superficielles et Cartographie

Il s'agit de donner les bases de géologie nécessaires en Génie Civil. Connaître l'origine des matériaux de la Terre en particulier comment se constituent les formations superficielles qui sont le réceptacle de la plupart des ouvrages de génie civil. Savoir représenter et lire ces informations sur une carte géologique.

Le détail de ce contenu est fourni dans deux documents spécifiques *Géologie générale* et *Cartographie géologique*. Les enseignements en face à face seront réalisés dans le module Mxg2.

2 Principaux matériaux de construction et leurs utilisations

Les matériaux de construction utilisés en génie civil doivent répondre à différentes fonctions :

- **Structurelles** : Ils doivent permettre de réaliser la structure de l'ouvrage, le gros œuvre. Ce sont les propriétés de résistance mécanique et de mise en œuvre qui sont alors déterminantes.
- **Protection et finition** : Ceci comprend la couverture et les huisseries qui permettent à l'ouvrage d'être hors d'eau et hors d'air et également les revêtements de surface, intérieurs et extérieurs qui assurent l'étanchéité à l'eau et à l'air ainsi que l'aspect esthétique. Dans ce cas les propriétés de résistance aux agents atmosphériques, de dureté de surface, de résistance à l'usure et d'aspect sont prépondérantes.
- **Thermiques** : L'ouvrage doit assurer un rôle thermique important qui se résume essentiellement à réduire les échanges thermiques par une isolation importante. Les propriétés d'inertie thermique sont également importantes dans le fonctionnement d'un bâtiment.
- **Conduction des fluides** : Electrique, hydraulique, aéraulique. La circulation des fluides est indispensable dans un bâtiment, qu'il s'agisse des courants électriques (forts et faibles), de l'eau (réseau de plomberie pour l'amenée et l'évacuation des eaux, chauffage) ou de l'air (ventilation, renouvellement d'air, chauffage). Dans de cas, les propriétés de conduction/isolation électrique et hydraulique sont les plus importantes.

Face à ces besoins, le constructeur recours à des matériaux variés que l'on peut classifier de différentes manières que l'on verra plus tard. Les principaux matériaux utilisés en génie civil, sans vouloir être exhaustif sont :

- **Sols, granulats et roches** pour la mise en forme des terrains, et le support des fondations et comme matière première pour le béton
- **Métaux** : Acier pour la structure, aluminium pour les huisseries, cuivre pour l'électricité et la plomberie.
- **Béton** : élaboré à partir de granulats et d'un liant, pour la structure essentiellement.
- **Fibres** : de verre, de roche, de bois, de chanvre pour l'isolation thermique et acoustique.
- **Matières plastiques**, pour l'isolation thermique, électrique, acoustique et pour les finitions
- **Céramiques** : obtenues par cuisson de l'argile, pour les parois (briques), pour la couverture (tuiles) et pour les revêtements de surface (carrelage)
- **Verre** : Pour les vitrages mais aussi parfois pour la structure.
- **Composites** comme le béton armé pour des usages très variés structurels ou autres.

Cette variété de besoins, d'usages et de matériaux, qui fait la richesse du génie civil, rend nécessaire une bonne connaissance des propriétés des matériaux de leur mode d'élaboration, de leur mise en œuvre mais aussi de la manière de les recycler. L'ensemble de ces connaissances permet de réaliser une analyse de cycle de vie, ACV, que nous verrons en fin de ce module.

3 Caractéristiques des principaux matériaux :

3.1 Paramètres de définition et de classement

Il existe de nombreuses manières de classer les matériaux,

- Origine : minérale, organique, ...
- Mode d'élaboration : naturel, manufacturé, de synthèse, ...
- Fonctions : structure, isolation, finition, ...
- Propriétés : mécanique, physique, esthétique, économique,...

Il est aussi possible d'aborder les matériaux en considérant des critères de sélection qui permettent de faire correspondre une fonction à une propriété. On distinguera alors les critères intrinsèques, qui sont propres au matériau et les critères attribués (ou extrinsèques) qui dépendent du contexte technique et socio-économique.

Classement par critères intrinsèques

- Propriétés mécaniques : résistance à l'effort, à la déformation, à la fatigue, ...
- Propriétés physico-chimiques : conductivité thermique, électrique, hydraulique, réactivité chimique
- Propriété de surface : dureté, rugosité, abrasivité, aspect

Classement par critères attribués

- Aptitude à la mise en forme : facilité de mise œuvre, degré de technicité requis, outillage nécessaire
- Economique : prix, disponibilité
- Esthétique
- Ecologique : impact sur l'environnement et sur l'utilisateur lors de l'élaboration, de la mise en œuvre, du recyclage,...

Exemple du tournevis :

Il s'agit d'un exemple qui peut paraître trivial mais suffisamment complexe pour montrer le processus de choix d'un matériau.

Fonction : faire tourner une vis manuellement

Critères de choix :

- dureté pour l'embout,
- rigidité pour la tige
- adhérence et confort pour le manche
- aspect attrayant pour la vente
- coût réduit pour la marge bénéficiaire

Proposer un choix de matériau (un ou plusieurs) pour répondre à ces critères.



3.2 Propriétés physiques

On considère ici les propriétés de base que sont la masse et le poids volumique.

De manière générale, un matériau, comme un granulat mais pas uniquement, possède une porosité plus ou moins comblée par de l'eau et de l'air (le cas échéant par d'autres liquides et gaz, par exemple dans le contexte pétrolier).

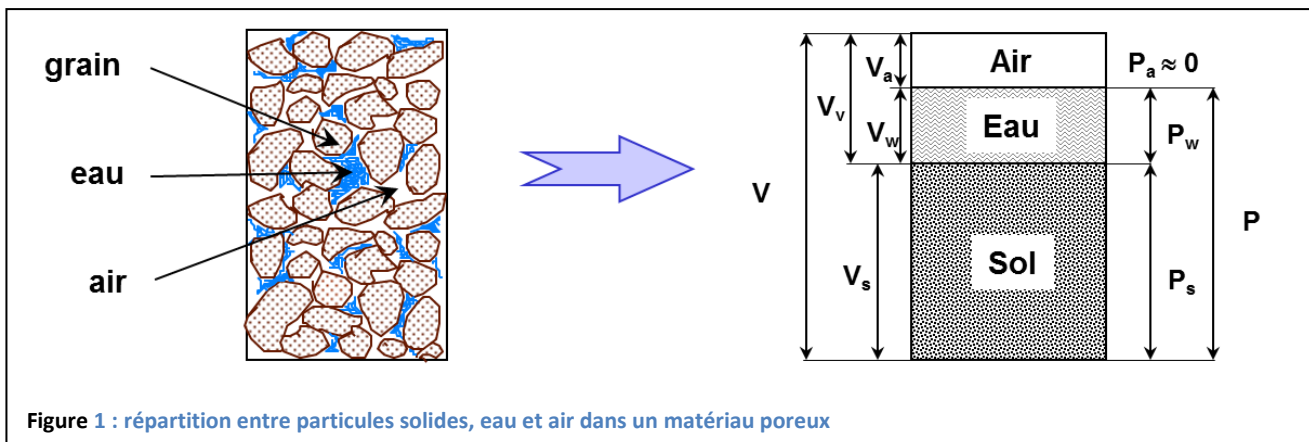


Figure 1 : répartition entre particules solides, eau et air dans un matériau poreux

| | | | |
|-------|---|------------|--|
| V | volume de l'échantillon de sol dit <i>volume apparent</i> | P, M | poids, masse de l'échantillon de sol |
| V_s | volume des grains solides dans V dit <i>volume absolu</i> | P_s, M_s | poids, masse des grains solides dans V |
| V_v | Volume des vides (abusivement car occupé par de l'eau et/ou de l'air) | | |
| V_w | volume de l'eau contenue dans V | P_w, M_w | poids, masse de l'eau contenue dans V |
| V_a | volume de l'air contenu dans V | P_a, M_a | poids, masse de l'air (négligeable) dans V |

La répartition volumique ou massique de ces trois composants, solide-air-eau, permet de caractériser un milieu poreux en fonction de sa porosité et de la quantité d'eau qu'il contient :

Masses volumiques [kg/m^3] ou Poids volumiques ou spécifiques [kN/m^3]

| Masses Volumiques | | Poids Volumiques | |
|---|--|--|---|
| ρ ou ρ_h masse volumique (humide) | $\rho = \frac{M}{V}$ $\rho_{sat} = sol\ saturé$ | γ ou γ_h poids volumique (humide) | $\gamma = \rho \cdot g = \frac{M \cdot g}{V}$ $\gamma_{sat} = sol\ saturé$ |
| ρ_d masse volumique du sol sec | $\rho_d = \frac{M_s}{V}$ | γ_d poids volumique du sol sec | $\gamma_d = \rho_d \cdot g = \frac{M_s \cdot g}{V}$ |
| ρ_s masse volumique des grains ou <i>absolue</i> | $\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$ | γ_s poids volumique des grains ou <i>absolu</i> | $\gamma_s = \rho_s \cdot g = \frac{M_s \cdot g}{V_s}$ |
| ρ_w masse volumique de l'eau | $\rho_w = \frac{M_w}{V_w} \approx 1000 kg/m^3$ | γ_w poids volumique de l'eau | $\gamma_w = \rho_w \cdot g = \frac{M_w \cdot g}{V_w}$ $\approx 10 kN/m^3$ |
| ρ masse volumique déjaugée | $\rho' = \rho_{sat} - \rho_w$ | γ' poids volumique déjaugée | $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ |

On définit les densités en rapportant à la masse ou au poids volumique de l'eau

| Densité | |
|--|---|
| d ou d _h densité humide | $d = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w}$ |
| d _d densité sèche | $d_d = \frac{\rho_d}{\rho_w} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$ |
| d _s ou G densité des grains | $d_s = G = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$ |

La proportion entre les différents espaces occupés par les grains, l'eau et l'air complète la détermination physique du matériau.

| | |
|--|---|
| Porosité | $n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_a + V_w}{V} = \frac{V - V_s}{V}$ |
| Compacité c = 1 - n | $c = \frac{V_s}{V} = \frac{V - V_v}{V}$ |
| Indice des vides e | $e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s}$ |
| Teneur en eau pondérale w [%] | $w = \frac{P_w}{P_s} = \frac{P - P_s}{P_s}$ |
| Teneur en eau volumique θ [%] | $\theta = \frac{V_w}{V}$ |
| Degré de saturation S _r [%] | $S_r = \frac{V_w}{V_v}$ |

Relations entre les paramètres physiques

| en fonction de | w | n | e | γ | γ _d |
|----------------|---|-----------------------------------|---|---|---|
| w | - | $\frac{S_r n}{(1-n)G}$ | $\frac{S_r e}{G}$ | $\frac{\gamma_s - \gamma}{\frac{G}{S_r} \gamma - \gamma_s}$ | $S_r \gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$ |
| n | $\frac{wG}{wG + S_r}$ | - | $\frac{e}{1+e}$ | $\frac{\gamma - \gamma_s}{S_r \gamma_w - \gamma_s}$ | $1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$ |
| e | $\frac{wG}{S_r}$ | $\frac{n}{1-n}$ | - | $\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma - S_r \gamma_w}$ | $\frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$ |
| γ | $\frac{\gamma_s (1+w)}{\frac{wG}{S_r} + 1}$ | $S_r n \gamma_w + (1-n) \gamma_s$ | $\frac{\gamma_s + S_r e \gamma_w}{1+e}$ | - | $\gamma_d \left(1 - \frac{S_r}{G} \right) + S_r \gamma_w$ |
| γ _d | $\frac{\gamma_s}{\frac{wG}{S_r} + 1}$ | $(1-n) \gamma_s$ | $\frac{\gamma_s}{1+e}$ | $\frac{\gamma - S_r \gamma_w}{1 - \frac{S_r}{G}}$ | - |
| S _r | $\frac{w}{\gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)} = \frac{w}{\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{1}{G} \right)} = \frac{\gamma - \gamma_d}{\gamma_w \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \right)} = \frac{wG}{e}$ | | | | |

Mesure de la masse volumique par la méthode de l'éprouvette graduée

On plonge un volume de granulat dont la masse, M , est connue, dans une éprouvette graduée contenant de l'eau. La variation de volume donne le volume absolu du granulat, V . La masse volumique s'obtient ensuite facilement par $\rho=M/V$.

Applications :

- 1) Un seau de 16 litres, pèse vide 1,5 kg. Une fois rempli de granulats, il pèse 32.9 kg.
Quelle masse volumique peut-on déterminer à partir de ces mesures ? Quelle est sa valeur numérique ?
- 2) Une quantité de granulat est pesée sur une balance, $M=500$ g. Elle est ensuite insérée dans une éprouvette contenant de l'eau. La variation de volume induite par le granulat dans l'éprouvette est de 200 ml ?
Quelle masse volumique peut-on déterminer à partir de ces mesures ? Quelle est sa valeur numérique ?
- 3) Une quantité de granulat humide est pesée sur une balance, $M=655$ g. Après séchage dans une étuve, la même quantité pèse 605 g
Quelle caractéristique du granulat humide peut-on déterminer à partir de ces mesures ? Quelle est sa valeur numérique ?

3.3 Mesures, incertitudes, variabilité et dispersion

Toutes les propriétés sont connues à travers des mesures qui sont entachées d'incertitudes qui conduisent à une imprécision sur les valeurs mesurées. Par ailleurs, les propriétés elles-mêmes sont caractérisées par une variabilité et une dispersion qui proviennent de la nature hétérogène du matériau considéré.

3.3.1 Mesures et Incertitudes

Incertitude d'une mesure :

Lorsqu'on réalise une mesure X , la vraie valeur x n'est pas directement accessible à cause de l'incertitude de mesure ΔX .

$$X=x+\Delta X \quad x \text{ valeur vraie, } \Delta X \text{ incertitude de mesure absolue}$$

$$\Delta X/X = \text{incertitude relative}$$

Somme, soustraction :

Pour une somme ou une soustraction les incertitudes absolues s'additionne

$$S=X+Y \quad \Delta S=\Delta X+\Delta Y$$

Produit , division

Pour un produit ou une division, les incertitudes relatives s'additionnent.

$$P=X.Y \quad \Delta P/P=\Delta X/X+\Delta Y/Y$$

Quotient, Division

$$D=X/Y \quad \Delta D/D=\Delta X/X+\Delta Y/Y$$

3.3.2 Variabilité, dispersion, moyenne et écart type

Indépendamment des incertitudes de mesures, les propriétés des matériaux sont intrinsèquement variables du fait de l'hétérogénéité. Par exemple la résistance à la compression d'un béton est variable du fait du mode de fabrication, de l'agencement des granulats, des bulles d'air emprisonnées etc ... Pour estimer ce type de propriétés, il faut réaliser plusieurs mesures qui constituent un échantillon (au sens statistique). On peut alors avoir une estimation de la moyenne et de la variabilité de la propriété qui nous intéresse.

Moyenne d'un échantillon

$$M(X) = \sum x_i / n \quad x_i = \text{valeur individuelle} \quad n = \text{nombre de valeurs dans l'échantillon}$$

Variance d'un échantillon

$$\text{Var}(X) = \sum (x_i - M)^2 / n = \sum (x_i)^2 / n - M^2 = \text{"moyenne des carrés - carré de la moyenne"}$$

Ecart type

$$s(X) = \text{Var}(X)^{1/2}$$

Dispersion

$$D = s(X) / M(X)$$

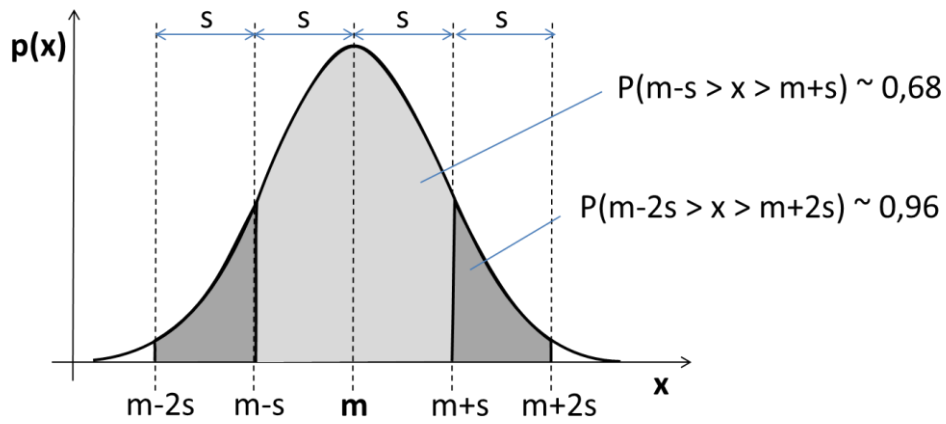
Loi normale

La dispersion des propriétés est liée à leur caractère aléatoire. Par exemple l'ensemble des éléments qui fait la résistance d'un béton est soumis à tellement de paramètres que sa valeur numérique peut être considérée comme le résultat d'un tirage aléatoire. Une certaine valeur numérique peut être obtenue avec une certaine probabilité. Pour décrire la relation entre les valeurs observées et leur probabilité d'occurrence on utilise une loi dite "distribution de probabilité" ou "distribution statistique". La loi la plus répandue dans la Nature est la loi normale dite loi de Gauss. Elle décrit la probabilité de voir apparaître une certaine valeur numérique connaissant la moyenne et l'écart type de l'échantillon.

$$p(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{s}\right)^2}$$

$p(x)$ est la (densité de) probabilité d'observer la valeur x connaissant la moyenne m et l'écart type s .

Pour la loi Normale, le maximum de densité de probabilité correspond à la moyenne. Elle possède une forme symétrique de part et d'autre de la moyenne.



La surface sous la courbe vaut 1, car l'ensemble des valeurs possibles doivent avoir une probabilité cumulée de 1.

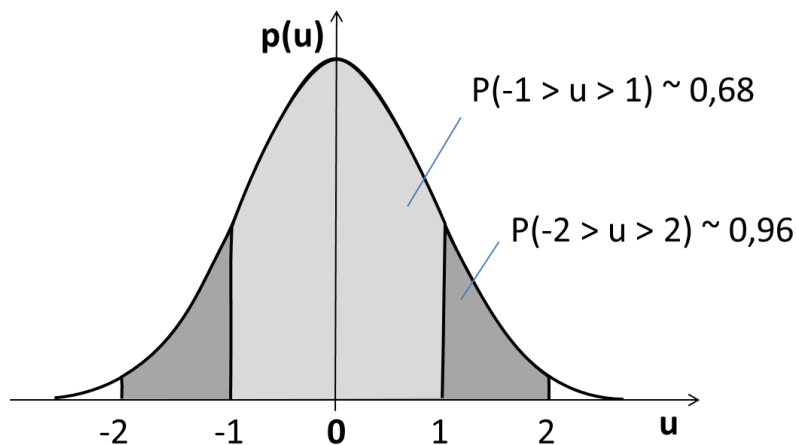
Environ 68% de valeurs se trouvent dans l'intervalle $[m \pm s]$ et 96% dans l'intervalle $[m \pm 2s]$.

Cette loi est aussi utilisée dans la norme française et européenne pour définir la valeur typique de résistance des matériaux. En effet, la résistance caractéristique est définie par la norme comme étant la valeur de résistance en dessous de laquelle peuvent se situer 5 % de la population de tous les résultats des mesures de résistance possibles effectués pour le volume de béton considéré (fractile de 5 %). Donc 95% des mesures donnent une résistance supérieure. Par exemple un béton de classe C20-25 correspond à une résistance en compression comprise entre 20 et 25 MPa et qui a une probabilité de 95 % d'être dépassée.

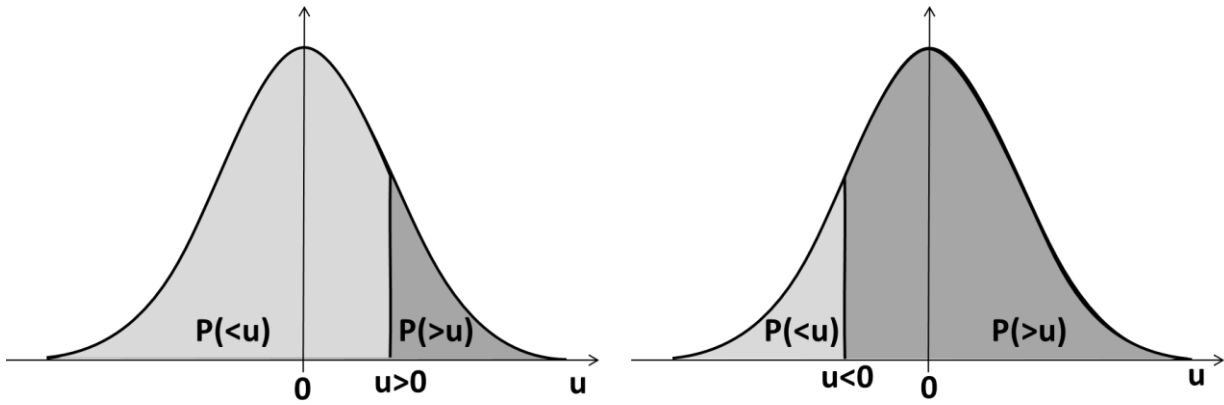
Forme centrée réduite

En remplaçant $(x-m)/s$ par u , on obtient une forme centrée et réduite

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u^2}$$



Elle est centrée car la distribution est alors symétrique par rapport à zéro, et réduite car x est normalisé par l'écart type. Cette forme est très commode car les valeurs de probabilité $P(>u)$ sont données dans des tables dites « de loi normale ». Par exemple, si on connaît u tel que $P(>u)=P_{seuil}$, on peut connaître la valeur x correspondant à ce seuil de probabilité simplement par $x=m+u.s$.



Quelques typiques valeurs à retenir :

| | |
|---------------|-----------|
| $P(>u)=0.95$ | $u=-1.65$ |
| $P(>u)=0.975$ | $u=-1.96$ |
| $P(>u)=0.99$ | $u=-2.33$ |

Application :

Une série de mesures de résistance en compression d'un béton donne une moyenne de 22.5 MPa avec un écart type de 3.5 MPa.

- Quelle est la valeur qui a 95 % de probabilité d'être dépassée ?
- Que devient cette valeur si on ne veut prendre qu'un risque de 1% d'être en deçà?

3.4 Comportement mécanique et rhéologique

3.4.1 Propriétés mécaniques de base

Notion de contrainte et de déformation

Un objet peut résister à un certain effort en fonction des propriétés de résistance du matériau dont il est constitué et de sa géométrie, en particulier de la section sur laquelle s'applique l'effort. Il est donc indispensable de séparer la part du matériau et celle de la géométrie. Pour cela on introduit la notion de contrainte, équivalente à celle de pression pour les fluides. Dans un cas simple où l'on ne considère qu'une seule direction d'application de l'effort, la contrainte, σ , se définit comme l'effort, F , divisé par la section, S , sur laquelle il s'applique, perpendiculaire à la direction d'application. Il s'agit de la contrainte normale.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{unité N/m}^2 \text{ ou Pa (Pascal)}$$

On voit qu'un objet subira une contrainte d'autant plus forte que la surface résistante est faible.

D'autre part, un objet change de dimension lorsqu'on lui applique un effort. De la même manière que précédemment la variation de dimension va dépendre de sa géométrie et des propriétés du matériau qui le constitue. En ne considérant qu'une seule direction, la déformation, ε , se définit comme la variation de longueur, ΔL , relative à la longueur initiale, L_0 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{sans unité, souvent exprimé en \%}$$

Il est très important ici de bien noter que l'effort, F , ou la variation de longueur, ΔL , s'appliquent à un objet qui possède des dimensions et une géométrie. Tandis que la contrainte, σ , et la déformation, ε , s'appliquent au matériau qui constitue l'objet.

Contrainte à la rupture

$\sigma_{rupture}$: contrainte à laquelle un matériau atteint la rupture.

On parle aussi de résistance à la rupture.

Valeurs typiques :

- Béton en compression : de 15-50 MPa pour un béton standard selon sa qualité
- Acier en traction : 200-1000 MPa
- Bois de hêtre en traction : 100-130 MPa

Déformation à la rupture

$\varepsilon_{rupture}$: déformation à laquelle un matériau atteint la rupture.

Valeurs typiques :

- Béton en compression : 1-2 %
- Acier en traction : 10-40% selon alliage
- Bois de hêtre en traction : 1%

Module élastique

E : Rapport de proportionnalité entre la déformation et la contrainte dans le domaine élastique.

Dénoté également module d'Young.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{unité identique à la contrainte, Pa}$$

Valeurs typiques :

- Béton : 20-50 GPa (10^9 Pa)
- Acier : 210 GPa
- Bois de hêtre : 10 GPa

Coefficient de Poisson

Au cours d'une sollicitation uniaxiale, telle qu'une traction, en plus de la déformation dans le sens et la direction de l'effort appliqué, un matériau se déforme également dans la direction perpendiculaire à l'effort et en sens inverse. Observe ainsi une contraction transversale lors d'une traction et une dilatation transversale lors d'une compression.

Le coefficient de Poisson, ν , donne le rapport de proportionnalité entre la déformation longitudinale, ε_L (dans la direction de la sollicitation) et la déformation transversale, ε_T .

$$\nu = \frac{-\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad \text{sans unité}$$

Le coefficient de Poisson est théoriquement compris entre 0 et 0,5. En pratique il varie généralement entre 0.2 et 0.4.

Limite élastique

Seuil en deçà duquel le matériau reste élastique, définit le plus souvent en contrainte et parfois en déformation.

σ_e : limite élastique en contrainte

ε_e : limite élastique en déformation

Résilience

Capacité à absorber l'énergie mécanique lors de la déformation. Forte pour le caoutchouc, faible pour le béton.

Fragilité/ductilité

Ductilité : capacité à se déformer significativement avant la rupture.

Fragilité : la rupture se produit peu après la limite élastique.

Viscosité

Capacité à se déformer avec le temps, même à contrainte constante.

Applications :

- 1) Un fil d'acier de 1 mm de diamètre est soumis à une traction : un poids de 10 kg est attaché à une extrémité, l'autre extrémité étant fixée.
Quelle est la contrainte supportée par l'acier ?
- 2) Lors de cette traction, la longueur initiale de 100 cm augmente de 0,6 mm.
Quelle est la déformation de l'acier ?
Quelle est son module élastique ?
- 3) Une éprouvette de béton, de diamètre 16 cm est, soumise à une compression uniaxiale dans une presse hydraulique. La charge maximale qu'elle atteint avant rupture est de 650 kN ?
Quelle est la contrainte maximale supportée par le matériau ?
S'agit-il d'un béton de bonne qualité ?

3.4.2 Comportements mécaniques de base

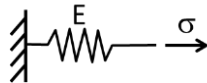
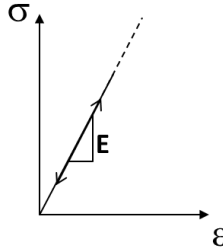
Pour des besoins de calcul et de dimensionnement, on associe le comportement mécanique des matériaux à des modèles dit *rhéologiques*, qui décrivent la manière dont le matériau se déforme. Ces modèles sont parfois associés à une représentation analogique faisant appel à des objets qui se comportent comme le matériau modélisé.

Elasticité Linéaire

C'est le modèle le plus utilisé car tous les matériaux possèdent une phase où ils se comportent de manière élastique et linéaire. L'élasticité fait référence au fait que le matériau, une fois déformé par une sollicitation mécanique, revient à sa géométrie initiale si la sollicitation est supprimée. Le comportement est dit réversible car, lorsqu'il est déchargé, le matériau restitue l'énergie mécanique fournie pour le déformer.

Dans les applications, en particulier en génie civil, on cherche à rester dans le domaine élastique car le matériau n'y subit pas de changement de propriétés mécaniques notables et en particulier conserve sa résistance.

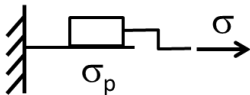
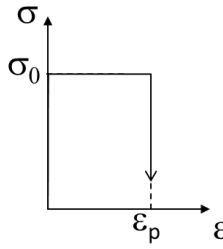
L'aspect linéaire correspond au fait qu'il y a proportionnalité entre la déformation et la contrainte. Le modèle analogique est un ressort qui possède les mêmes propriétés de réversibilité et de linéarité. Mais attention, un ressort se caractérise par une raideur (N/m) alors qu'un matériau élastique se caractérise par un module élastique (N/m²).

| Expression analytique | Modèle analogique | Comportement mécanique |
|--------------------------------|--|--|
| $\sigma = E \cdot \varepsilon$ |  |  |

Plasticité

Lorsqu'un matériau est sollicité au-delà de sa limite élastique, une phase de déformation irréversible apparaît. Une part de l'énergie de déformation est dissipée par des phénomènes locaux (glissement entre grains, déformation permanente intercrystalline ...) et le matériau ne reprend pas sa géométrie initiale lors de la décharge. Ce phénomène s'observe sur les métaux, les plastiques, les sols et les roches. Il s'accompagne de modifications de la micro-structure du matériau qui est susceptible de perdre ses propriétés de résistance.

La déformation augmente de manière importante lorsque la contrainte atteint le seuil de plasticité σ_p .

| Expression analytique | Modèle analogique | Comportement mécanique |
|---|---|---|
| $\varepsilon \nearrow$ si $\sigma = \sigma_p$ |  |  |

Le modèle analogique est un bloc frottant sur une surface.

Ce modèle est en général associé à un ressort qui représente la part de comportement élastique. On parle alors de modèle **élasto-plastique**.

| Expression analytique | Modèle analogique | Comportement mécanique |
|--|-------------------|------------------------|
| $\varepsilon = \sigma / E$ si $\sigma < \sigma_p$ $\varepsilon \nearrow$ si $\sigma = \sigma_p$ | | |

Viscosité


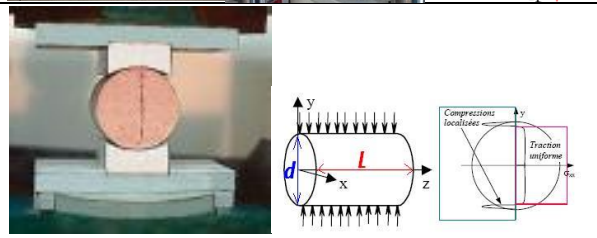

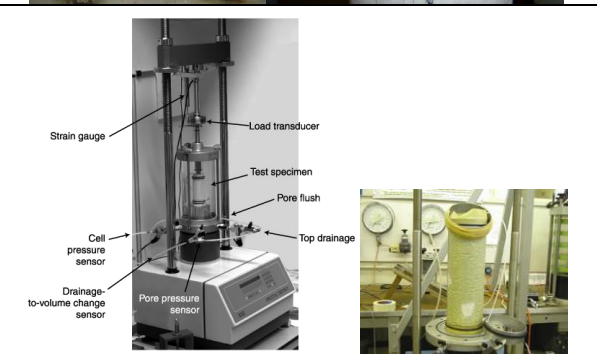
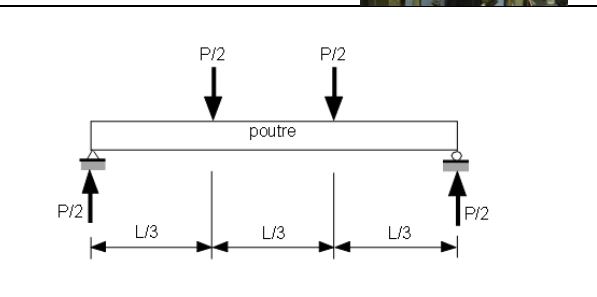
La viscosité est la capacité d'un matériau à se déformer sous une contrainte constante. La vitesse de déformation est fonction de la contrainte appliquée. La plupart de matériau possède une viscosité mais elle n'est pas forcément perceptible à l'échelle de temps des ouvrages de génie civil. Les vitrages déformés que l'on peut observer dans les vieilles bâtisses est une illustration de la viscosité du verre qui se révèle à grande échelle de temps, alors que le verre est très fragile lorsqu'on le sollicite à courte échelle de temps.

| Expression analytique | Modèle analogique | Comportement mécanique |
|--|-------------------|------------------------|
| $\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$ $\varepsilon = \frac{\sigma \cdot t}{\eta}$ | | |

3.4.3 Essais mécaniques standards

La caractérisation mécanique des matériaux passe par la réalisation d'essais sur des éprouvettes au laboratoire. Le dispositif utilisé dépend du type de sollicitation (traction, compression, flexion, cisaillement, ...) du matériau et de la forme des éprouvettes.

Différents type d'essais :

| | |
|--|--|
| <p>Traction directe : Très utilisé pour les métaux, les plastiques et le bois. Nécessite une éprouvette de forme adaptée pour assurer le chargement en traction homogène. La force appliquée induit une extension de l'éprouvette.</p> |  |
| <p>Traction indirecte : Un cylindre est soumis à une compression sur ses génératrices ce qui induit une traction au centre du cylindre. Très utilisé pour les bétons et les roches car il ne nécessite pas un usinage complexe, délicat à réaliser pour ces matériaux.</p> |  |
| <p>Compression simple : Une éprouvette (le plus souvent cylindrique) est comprimée en la plaçant entre les deux plateaux d'une presse. Facile à réaliser car ne demande pas d'éprouvette de géométrie complexe. Très utilisée pour les roches et les bétons. Le terme simple indique un chargement selon une seule direction.</p> |  |
| <p>Compression multiaxiale (bi ou tri-axiale) : La sollicitation s'applique sur plusieurs directions perpendiculaires afin de simuler le chargement que l'on peut retrouver dans le sous-sol ou dans des assemblages complexes. L'essai de compression triaxial de révolution (éprouvette cylindrique avec une pression de fluide appliquée latéralement) est très utilisé pour les roches et les sols (sables, argiles).</p> |  |
| <p>Flexion : Une éprouvette de grand élanement est chargée perpendiculairement à sa grande dimension pour simuler la sollicitation de poutres horizontales ou de planchers supportant une charge verticale. Très utilisé pour l'acier, le bois et le béton (armé ou non). La répartition des contraintes dans l'éprouvette dépend du nombre de points d'appuis et de chargement.</p> |  |

3.4.4 Comportements observés expérimentalement

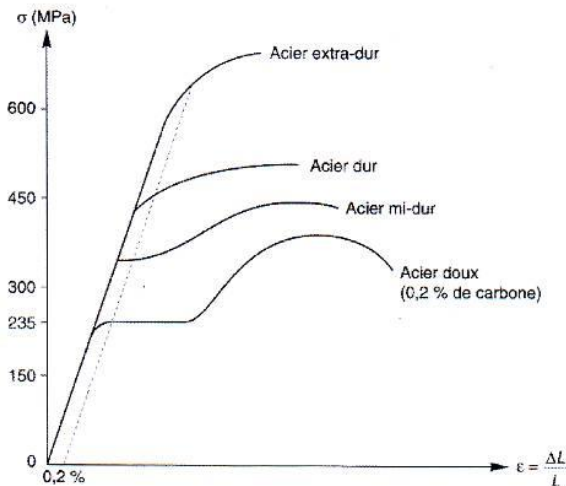
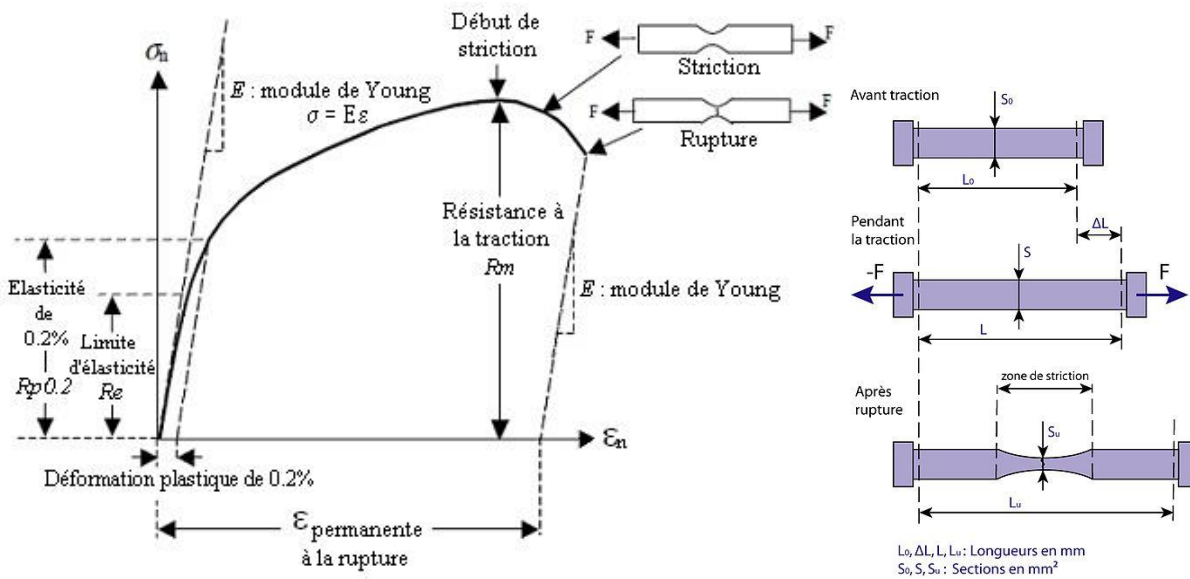
Acier en traction

Le comportement de l'acier en traction montre successivement :

- une phase élastique,
- une phase plastique sans changement notable de la forme de l'éprouvette
- une phase plastique caractérisée par le phénomène de striction, une réduction de section sur une partie de l'éprouvette
- La rupture se produit dans la zone de striction

On définit par convention la limite élastique à 0.2% de déformation permanente (ou plastique).

L'étendue respective de ces différentes phases dépend du type d'acier. Un acier doux aura une grande plage plastique avec une limite élastique assez basse tandis qu'un acier haute performance (dit acier dur) aura une plage plastique plus faible avec une limite élastique très élevée.

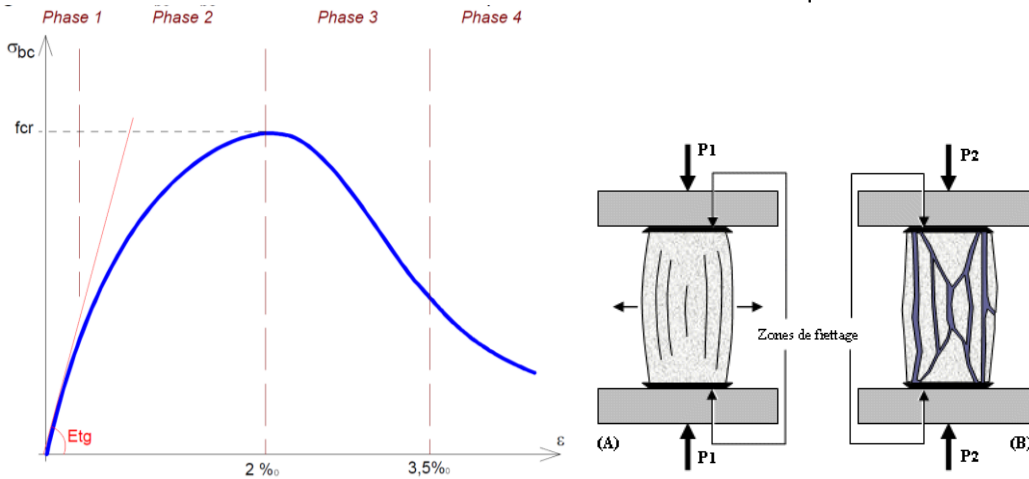


Béton en compression

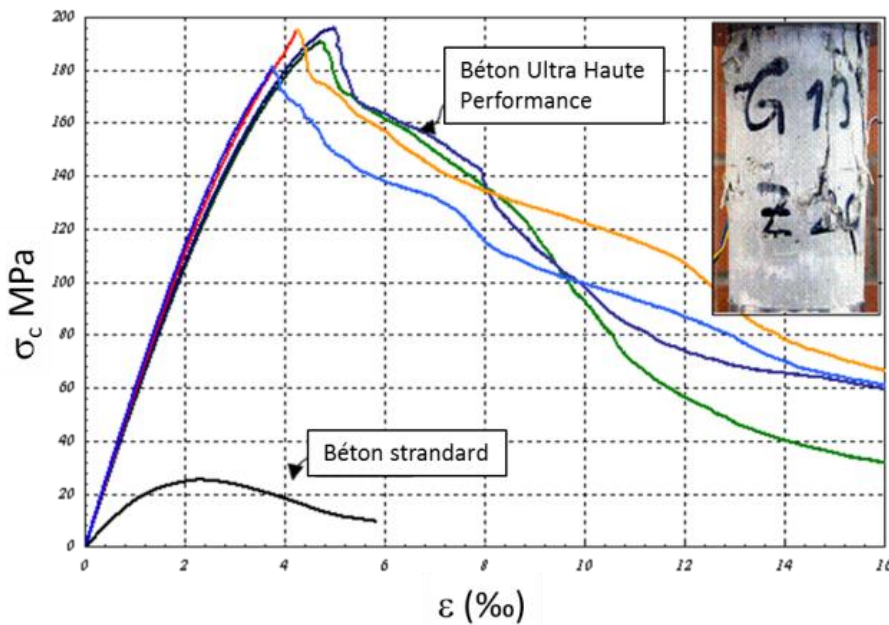
Le comportement du béton en compression typique est représenté par la figure suivante. Ici la convention pour la contrainte et la déformation est de compter positivement la compression et le raccourcissement. C'est la convention généralement utilisée en génie civil, de signe opposée à celle utilisée pour la traction des aciers.

Les différentes phases du comportement observée sont les suivantes :

- Phase 1 : Comportement élastique, quasiment linéaire, définit par le module élastique tangent, E_{tg}
- Phase 2 : initiation de la micro-fissuration qui induit une courbure de la courbe contrainte-déformation, la résistance reste croissante jusqu'à la valeur maximale de résistance
- Phase 3 : Fissuration longitudinale importante qui s'accompagne d'une diminution de la résistance mécanique
- Phase 4 : ruine de l'échantillon avec une résistance mécanique très faible.



Ce comportement, typique pour les bétons standards, peut être largement amélioré pour des bétons dits *haute performance*, BHP, ou *très haute performances*, BTHP, voire *ultra haute performance*, BUHP.



3.5 Propriétés thermiques, acoustiques, électriques

On se concentre dans ce module essentiellement sur les propriétés physiques de base (masse volumique,...) et mécaniques. Mais un matériau se caractérise également par des propriétés thermiques, acoustiques et électriques qui seront vues en détail dans d'autres modules. Nous citerons ici essentiellement les propriétés thermiques qui jouent un rôle primordial dans les bâtiments qui doivent être le plus économes possible en énergie pour le chauffage et la climatisation.

Conductivité Thermique :

Capacité d'un matériau à conduire la chaleur

$$\lambda \quad \text{unité W/(m.°K)}$$

Une valeur faible (< 0.1) permettra de réaliser un isolant thermique

Valeurs typiques :

- Laine de roche, de verre ou de fibre végétales 0.032-0.04 W/(m.°K)
- Béton : 1.5-2.1 W/(m.°K)
- Acier : 30-50 W/(m.°K)
- Aluminium : 237 W/(m.°K)

Chaleur spécifique (ou capacité calorifique).

Quantité de chaleur à fournir à un matériau pour faire varier sa température

$$C \quad \text{unité J/(kg.°K)}$$

Cette propriété conditionne l'inertie thermique, plus elle est élevée, plus le matériau peut stocker de la chaleur. C'est un point très important pour le comportement dynamique (en fonction du temps) des bâtiments en particulier pour le confort d'été.

Valeurs typiques :

- Roche, Béton : 800-1000 J/(kg.°K)
- Acier : 500 J/(kg.°K)
- Aluminium : 900 J/(kg.°K)
- Eau liquide : 4180 J/(kg.°K)
- Bois : 1200-2000 J/(kg.°K)

Effusivité

Capacité des matériaux à absorber (ou restituer) plus ou moins rapidement un apport de chaleur.

$$E_f \quad \text{unité j / (m}^2 \cdot \text{s.°C)}$$

L'effusivité caractérise la sensation de chaud ou de froid que donne un matériau. Si la valeur d'effusivité est élevée, le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement en surface (métal, pierre, faïence...). A l'inverse une valeur d'effusivité faible indique que le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur (isolant, bois...). La valeur E_f exprime combien de joules ont pénétré sur 1 m² de surface de matériau, 1 seconde après qu'elle est été mise en contact avec une autre surface de 1 m² plus chaude qu'elle de 1 °C.

Elle est fonction de la chaleur spécifique, C , de la conductivité thermique, λ , et de la masse volumique ρ .

$$E_f = \sqrt{\lambda \rho C}$$

Valeurs typiques :

- Bois : 600 j / (m².s.°C)
- Béton : 2000 j / (m².s.°C)
- Acier : 11 000 j / (m².s.°C)
- Aluminium : 24 000 j / (m².s.°C)

3.6 Durabilité, altération, corrosion

La durabilité d'un matériau ou d'un ouvrage est sa propriété à remplir ses fonctions sur le long terme. Il doit pour cela résister aux agents extérieurs susceptibles d'altérer ses propriétés. Par abus de langage récent, on parle d'un matériau durable lorsqu'il respecte les critères du développement durable alors qu'au sens premier il s'agit d'un matériau qui dure longtemps.

Les principaux agents d'altération des matériaux sont donnés ci-dessous

Feu : La température élevée, au cours d'un incendie par exemple, peut engendrer

- Fusion de matériaux solides en particulier les matières plastiques et les métaux.
- Combustion des matériaux inflammables comme les plastiques et le bois
- Fissuration des matériaux fragiles comme le béton ou les roches

Gel : les matériaux contenant de l'eau peuvent se fissurer lorsque celle-ci gèle, par effet de changement de volume et de cryo-succion. On parle parfois de cryo-fracturation. Le béton, le bois, la brique sont particulièrement sensibles au gel

Variations de température : les matériaux soumis à de fortes variations de température s'altèrent par effet de dilatation thermique différentielle (béton, roches) et par changement de comportement mécanique : plus ductile à chaud et plus fragile à froid. C'est en particulier le cas pour les plastiques et les métaux.

Soleil : Le rayonnement solaire, en particulier les ultra-violets, altère les matériaux tels que les plastiques et le bois en cassant les liaisons atomiques. Les matériaux deviennent friables, cassants et perdent leur couleur.

Air : L'air agit comme agent d'altération essentiellement par l'humidité et les polluants qu'il peut transporter.

Eau : L'eau agit en favorisant l'oxydation des métaux et par effets capillaires sur les matériaux poreux (béton, brique, bois, fibres,...). Il favorise également les développements de mousses et de champignons qui attaquent le bois. Si elle contient du sel (eau de mer) son effet est fortement amplifié.

Pollution : Les polluants atmosphériques (pluies acides, micro particules,...) favorisent l'oxydation et l'altération des métaux, du béton, du bois, des céramiques (tuiles) et des plastiques. Les polluants peuvent aussi être contenus dans l'eau et s'associer à elle pour augmenter l'altération.

Insectes : Les insectes xylophages en se nourrissant de bois détruisent sa structure.

4 Impact environnemental et Analyse de Cycle de Vie

Le domaine du bâtiment est en première ligne en ce qui concerne la dépense énergétique car il représente l'un des postes les plus consommateurs en énergie avec le transport.

La dépense énergétique des bâtiments concerne essentiellement le chauffage et la climatisation et les équipements. Mais la part représentée par les matériaux est elle aussi très importante que ce soit pour leur élaboration, leur utilisation ou leur recyclage. L'impact des bâtiments sur l'environnement est lui aussi un point important car ils sont le réceptacle principal de l'activité humaine dans le domaine privé et professionnel. Les polluants émis par les bâtiments ont donc un impact très fort sur la santé humaine. D'autre part, l'impact sur les ressources en énergie et matières premières est également très important car les volumes mis en jeu sont considérables.

Les préoccupations actuelles de préservation de l'environnement naturel et des ressources ont conduit à la prise en compte de l'impact des bâtiments sur ces deux points avec pour objectif de le réduire le plus possible. Les sections suivantes donnent les bases des analyses que l'on peut faire de l'impact d'un bâtiment sur différents points avec pour objectif de les réduire ou de choisir les solutions les plus favorables. La complexité et la diversité des matériaux utilisés dans le domaine de la construction ont nécessité la mise en place de méthodes particulières que nous allons présenter dans les sections suivantes.

4.1 Impact et performance environnementale

La recherche d'objectivité dans l'estimation de l'impact et de la performance environnemental des constructions nécessite d'une part de considérer tous les domaines environnementaux concernés et d'autre part de fournir des données quantitatives.

Le premier pas dans ce sens est la démarche haute qualité environnementale HQE.

Haute qualité environnementale HQE :

La démarche HQE intègre toutes les phases d'un projet : conception, construction, fonctionnement et déconstruction d'un bâtiment. C'est une démarche volontaire de management de la qualité environnementale d'un bâtiment. Les acteurs de la construction doivent procéder à des choix réfléchis en se fondant sur la qualité environnementale des bâtiments déclinée en 14 cibles concernant 4 domaines.

| Domaines | Cibles | |
|------------------|--------|--|
| Eco-construction | 1 | Relation des bâtiments avec l'environnement immédiat |
| | 2 | Choix intégré des procédés et produits de construction |
| | 3 | Chantier à faibles nuisances |
| Eco-gestion | 4 | Gestion de l'énergie |
| | 5 | Gestion de l'eau |
| | 6 | Gestion des déchets d'activité |
| | 7 | Gestion de l'entretien et de la maintenance |
| Confort | 8 | Confort hygrothermique |
| | 9 | Confort acoustique |
| | 10 | Confort visuel |
| | 11 | Confort olfactif |
| Santé | 12 | Qualité sanitaire des espaces |
| | 13 | Qualité sanitaire de l'air |
| | 14 | Qualité sanitaire de l'eau |

Cette démarche a été l'une des premières mises en place dans le domaine de la construction et a l'intérêt de prendre en compte l'aspect global nécessaire pour estimer l'impact environnemental. Elle possède le défaut d'être très qualitative et très peu quantitative et de mettre sur le même plan des points que l'on peut considérer comme étant d'une importance très différente (par exemple chantier à faible nuisances et gestion de l'énergie). D'autre part, elle est très peu encadrée réglementairement et ne se traduit le plus souvent que par un label apposé à une construction.

Performance environnementale des bâtiments

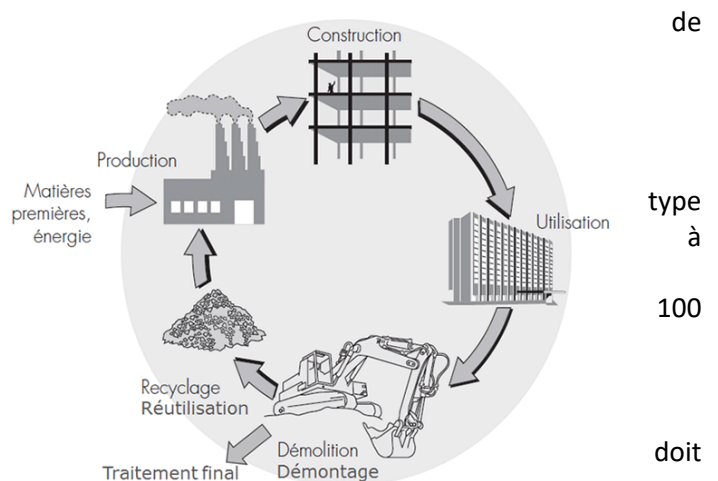
Aujourd'hui, dans la démarche HQE, les objectifs à atteindre sont fixés par le maître d'ouvrage pour son projet. Pour aller plus loin dans l'évaluation des projets de construction, la performance environnementale des bâtiments (PEB) a été retenue par la normalisation française, la normalisation européenne et internationale. Ceci passe par une analyse de l'impact des différents matériaux constituant la construction en considérant toutes les étapes de la vie du matériau (élaboration, utilisation, destruction/recyclage) et les différents domaines qui peuvent être impactés (produits de construction, consommation d'énergie, consommation d'eau, rejets liquide et gazeux, etc.). Il s'agit de l'analyse de cycle de vie (ACV). On obtient ainsi un ensemble de données chiffrées représentatives des grands enjeux environnementaux : changement climatique, consommation énergétique, consommation d'eau, déchets, etc. Ces indicateurs quantitatifs doivent alors être optimisés globalement en fonction des objectifs et des contraintes du projet. Ils constituent la base de l'évaluation de la performance environnementale des bâtiments.

4.2 Analyse de Cycle de Vie - ACV

ACV. Méthode d'évaluation environnementale qui permet de quantifier les impacts d'un produit (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service voire d'un procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation. Outil normalisé et reconnu, l'ACV est la méthode la plus aboutie en termes d'évaluation globale et multicritère. Elle résulte de l'interprétation du bilan quantifié des flux de matières et énergies liés à chaque étape du cycle de vie des produits, exprimée en impacts potentiels sur l'environnement. (Source : site ADEME)

Dans le domaine de la construction l'ACV prend une importance de plus en plus grande car elle permet un chiffrage comparatif entre plusieurs solutions impliquant des matériaux différents.

L'étude d'impact concerne les différentes phases vie d'un matériau, production – transport - mise en œuvre-utilisation-élimination, et dix domaines environnementaux. Le tableau suivant donne l'ensemble de ces domaines. Les unités utilisées dépendent de chaque domaine en fonction du d'impact prise en compte. Ces unités se rapportent une certaine durée de vie escomptée pour le matériau ou l'ouvrage (généralement entre 50 et ans). Il s'agit de la **durée de vie typique (DVT)**. La quantification se rapporte également à une **unité fonctionnelle (UF)** qui se rapporte à l'utilisation faite du matériau et de la fonction qu'il remplir et à la durée.



Unité fonctionnelle

Il s'agit de l'unité de compte à laquelle va se référer le bilan environnemental ou ACV. On choisit, par exemple, le m² en œuvre pour un produit de couverture, pour un produit de cloisonnement ou pour un mur. Cela peut être le mètre linéaire pour une canalisation, l'unité pour un équipement... Cette unité dépend du service rendu par le produit étudié. Pour une cloison thermique on donnera la résistance thermique L'unité fonctionnelle prend en compte une durée appelée Durée de Vie typique (DVT) Cette unité comprend l'ensemble des constituants du produit y compris les emballages. Le déclarant doit fournir la liste des produits complémentaires nécessaires à la mise en œuvre du produit. Selon les cas, ces produits complémentaires peuvent être intégrés dans l'ACV.

| N° | Impact environnemental | Unité par UF | Unité pour toute la DVT | Explication unité |
|----|--|-----------------------------------|-------------------------------|---|
| 1 | Consommation de ressources énergétiques Energie primaire totale Dont énergie récupérée Energie renouvelable Energie non renouvelable | | MJ | Energie consommée |
| 2 | Epuisement de ressources (ADP) | kg équivalent antimoine (Sb)/UF | kg équivalent antimoine (Sb) | Voir ci-dessous |
| 3 | Consommation d'eau totale | Litres/ UF | Litres | |
| 4 | Déchets solides Déchets valorisés (total) Déchets éliminés Déchets dangereux Déchets non dangereux Déchets inertes Déchets radioactifs | kg/UF | kg | |
| 5 | Changement climatique | kg équivalent CO ₂ /UF | kg équivalent CO ₂ | masse de CO ₂ donnant le même impact climatique |
| 6 | Acidification atmosphérique | kg équivalent SO ₂ /UF | kg équivalent SO ₂ | masse de SO ₂ donnant la même acidification |
| 7 | Pollution de l'air | m ³ /UF | m ³ | Volume d'air pollué au seuil de risque sanitaire |
| 8 | Pollution de l'eau | m ³ /UF | m ³ | Volume d'eau pollué au seuil de risque sanitaire |
| 9 | Destruction de la couche d'ozone stratosphérique R11/UF 0 kg CFC | kg CFC R11 équivalent / UF | kg CFC R11 | masse de CFC donnant la même destruction d'ozone atmosphérique |
| 10 | Formation d'ozone photochimique | kg équivalent éthylène/UF | kg équivalent éthylène | masse d'éthylène donnant la même quantité d'ozone photochimique |

Ces informations chiffrées sont fournies par les fabricants sous la forme de fiches de déclaration environnementales et sanitaires (FDES). Elles sont publiées via la base de données l'INIES. www.inies.fr

Explications complémentaires

(extraits du document CTIB N10 – Juillet 2005 Comité technique de la base INIES)

Epuisement des ressources

Cet indicateur, tient compte des consommations de ressources énergétiques ou non énergétiques (sauf l'eau) en pondérant chaque ressource par un coefficient correspondant à un indice de rareté (l'antimoine a une valeur de 1 par convention). Une valeur supérieure à 1 pour une ressource indique que l'on consomme une ressource plus rare que l'antimoine. Les ressources dont la valeur de l'indicateur est très faible (inférieure à 0,001) sont considérés comme non épuisables à l'échelle humaine. L'indicateur est calculé en faisant la somme pondérée (par les coefficients de rareté) des quantités consommées par le produit pendant tout son cycle de vie. Donc, plus cet indicateur est grand plus le produit "épuise" les ressources. Il s'exprime donc en kg antimoine équivalent.

Changement climatique

Cet indicateur sert à évaluer la contribution du produit à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre. L'augmentation de l'effet de serre entraîne des modifications du climat de la Terre, et notamment une augmentation de la température moyenne, d'où le nom de l'indicateur. Il est exprimé en kg équivalent CO₂ (dioxyde de carbone ou gaz carbonique) et regroupe toutes les émissions de gaz à effet de serre. Tous les gaz n'ont pas le même effet. Ainsi, un

kilogramme de méthane (CH₄) contribue 21 fois plus à l'effet de serre qu'un kilogramme de CO₂, et un kilogramme de protoxyde d'azote (N₂O) 310 fois plus. Certains gaz contribuent plusieurs milliers de fois plus que le CO₂ à l'effet de serre pour chaque kilogramme émis.

Acidification atmosphérique

Certains composés émis dans l'atmosphère (notamment le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x) sont susceptibles d'être oxydés et de se transformer en acides (acide sulfurique, acide nitrique)) qui sont ensuite lessivés par les précipitations (pluies acides) et se retrouvent dans les eaux de ruissellement et de surface. Cette acidification conduit à des impacts importants sur la faune et la flore. Cet indicateur est construit comme l'indicateur changement climatique en prenant pour référence la contribution à l'acidification du SO₂ (valeur 1 du coefficient d'agrégation). Il est donc exprimé en kg équivalent SO₂.

Pollution de l'air

Cet indicateur a pour but d'évaluer les impacts toxiques et écotoxiques des émissions dans l'air du produit. Ce sont surtout les métaux et les composés organiques qui contribuent à cet impact. Dans le cadre de la norme, l'indicateur est exprimé en m³ d'air nécessaire à diluer les émissions du produit en se basant sur les valeurs limites de la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Cet indicateur permet d'avoir une représentation simple (un volume d'air) de l'impact potentiel du produit sur la qualité de l'air dans l'environnement.

Pollution de l'eau

Cet indicateur a pour but d'évaluer les impacts toxiques et écotoxiques des émissions dans l'eau et dans le sol du produit. Ce sont surtout les métaux et les composés organiques qui contribuent à cet impact. L'indicateur est exprimé en m³ d'eau nécessaire à diluer les émissions du produit en se basant sur les valeurs limites de la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Comme pour la pollution de l'air, cet indicateur permet d'avoir une représentation simple (un volume d'eau) de l'impact potentiel du produit sur la qualité de l'eau dans l'environnement.

Destruction de la couche d'ozone stratosphérique

Cet indicateur cherche à évaluer la contribution du produit à la destruction de la couche d'ozone dite stratosphérique. L'ozone est une molécule présente dans l'atmosphère et de manière plus concentrée dans la stratosphère (entre 8-18 km et 50 km d'altitude) où elle forme une « couche ». Cette couche joue un rôle de filtrage des rayons ultraviolets dangereux (UV-B). Cet indicateur se calcule en agrégeant les émissions dans l'air des composés susceptibles de réagir avec l'ozone de la stratosphère (et notamment les chlorofluorocarbures : CFC, HCFC). La molécule de référence est le CFC 11. L'indicateur s'exprime en kg équivalent CFC 11.

Formation d'ozone photochimique

Alors que l'ozone est un gaz protecteur dans les hautes couches de l'atmosphère (voir destruction de la couche d'ozone stratosphérique), c'est au contraire un gaz dangereux (irritant respiratoire) dans les basses couches de l'atmosphère (troposphère) où nous vivons et respirons. Cet indicateur sert donc à évaluer la contribution des émissions dans l'air de composés susceptibles de participer à la formation d'ozone troposphérique. L'ozone résulte de la transformation chimique de l'oxygène au contact d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures, sous l'effet du rayonnement solaire et d'une température élevée (phénomène de smog photochimique ou « pics d'ozone »). La molécule de référence pour cet indicateur est l'éthylène (C₂H₂), il s'exprime donc en kg équivalent éthylène.

4.3 Fiches de déclarations environnementales et sanitaires (FDES).

Une FDES est un document standardisé qui présente les résultats d'analyse de cycle de vie ainsi que des informations sanitaires. Les FDES sont encadrées par la norme NF P 01-010.

Chaque FDES présente les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie d'un produit, de l'extraction des matières premières ayant servi à le fabriquer jusqu'à sa fin de vie.

Chaque fiche contient, entre autres :

- une description du produit et de sa fonction,
- son profil environnemental (ensemble des indicateurs environnementaux),
- les informations santé - confort liées à son usage, ainsi que des indications sur l'émetteur de la fiche en question.

Les FDES sont accessibles gratuitement par le site internet de l'INIES. INIES est une base de données publique et nationale qui elle intègre les FDES, conformes à la norme NF P 01-010. , au fur et à mesure de leur validation.

Un Conseil de surveillance veille à son éthique et à la déontologie de son fonctionnement. Il définit la politique générale en matière de contenu de la base et de mise en ligne à partir de propositions motivées, fournies par le Comité technique qui vérifie notamment la conformité à la NF P 01-010.

1. Caractérisation du produit selon NF P 01-010

1.1 Définition de l'Unité fonctionnelle (UF)

Assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) sur 1 m² de paroi pendant une annuité, tout en assurant une isolation acoustique (Rw (C, Ctr) de 54 (-3, -5) dB additive à celle d'un doublage) et une isolation thermique (Résistance thermique de 0,21 m².K/W additive à celle d'un doublage). Le produit est mis en œuvre selon les règles de l'art.

1.2 Masse de produit nécessaire pour l'unité fonctionnelle (UF)

Quantité de produits et éventuellement de produits complémentaires et d'emballage de distribution contenue dans l'UF sur la base d'une Durée de Vie Typique (DVT) de 100 ans.

La fonction est assurée par un mur de blocs en béton de granulats courants (10 blocs par m² de mur), de dimensions nominales 500 x 200 x 200 mm, de classe B40, creux à deux rangées de lame d'air, faisant l'objet d'une certification NF selon la norme NF EN 771-3 et son complément national NF P 12 023-2.

Produit

- 182 kg de blocs en béton sont nécessaires à la mise en œuvre d'un m² de mur soit 1,82 kg pour l'UF.

Produit complémentaire

- 55 kg de mortier de pose nécessaire à la mise en œuvre d'un m² de mur, soit 0,55 kg pour l'UF.

Emballage de distribution

- une palette en bois pour 70 blocs (9 rotations en moyenne), soit 4 g pour l'UF.

Note :

Le mortier de pose des blocs (joints horizontaux et verticaux) ainsi que l'emballage des produits (blocs et produits complémentaires notamment le ciment du mortier de pose) sont comptabilisés dans les données.

Le taux de chutes comptabilisé lors de la mise en œuvre est de 4 %.

1.3 Caractéristiques techniques utiles non contenues dans la définition de l'unité fonctionnelle

Le mur est apte à recevoir tout type d'enduit et de doublage extérieur ou intérieur.

Les données d'inventaire de cycle de vie qui sont présentées ci-après ont été calculées pour l'unité fonctionnelle définie en 1.1 et 1.2

2. Données d'inventaire et autres données selon NF P 01-010 Commentaires relatifs aux effets environnementaux et sanitaires du produit

2.1 Consommations des ressources naturelles

2.1.1 Consommation des ressources naturelles énergétiques et indicateurs énergétiques

Consommation des ressources naturelles énergétiques

| Flux | Unités | Production | Transport | Mise en œuvre | Vie en œuvre | Fin de vie | Total cycle de vie ³ | |
|-------------|--------|------------|-----------|---------------|--------------|------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | | | | | | Par annuité ¹ | pour toute la DVT ² |
| Bois | kg | 1,34E-02 | | | | | 1,34E-02 | 1,34E+00 |
| Charbon | kg | 2,99E-03 | 2,25E-06 | 1,41E-03 | | 5,01E-06 | 4,41E-03 | 4,41E-01 |
| Lignite | kg | 3,43E-05 | | 1,36E-06 | | | 3,60E-05 | 3,60E-03 |
| Gaz naturel | kg | 2,11E-03 | 5,69E-05 | 3,92E-04 | | 1,27E-04 | 2,69E-03 | 2,69E-01 |
| Pétrole | kg | 1,04E-02 | 2,42E-03 | 4,88E-03 | | 5,38E-03 | 2,31E-02 | 2,31E+00 |
| Uranium (U) | kg | 5,53E-07 | | 1,74E-07 | | | 7,31E-07 | 7,31E-05 |

Indicateurs énergétiques

| Flux | Unités | Production | Transport | Mise en œuvre | Vie en œuvre | Fin de vie | Total cycle de vie | |
|--------------------------|--------|------------|-----------|---------------|--------------|------------|--------------------|-------------------|
| | | | | | | | Par annuité | pour toute la DVT |
| Énergie Primaire Totale | MJ | 1,02E+00 | 1,04E-01 | 3,94E-01 | | 2,30E-01 | 1,74E+00 | 1,74E+02 |
| Énergie Renouvelable | MJ | 1,26E-01 | 4,03E-05 | 2,38E-02 | | 8,98E-05 | 1,50E-01 | 1,50E+01 |
| Énergie Non Renouvelable | MJ | 8,90E-01 | 1,03E-01 | 3,70E-01 | | 2,30E-01 | 1,59E+00 | 1,59E+02 |
| Énergie procédé | MJ | 9,33E-01 | 1,04E-01 | 3,93E-01 | | 2,30E-01 | 1,66E+00 | 1,66E+02 |
| Énergie matière | MJ | 8,37E-02 | | 5,95E-04 | | | 8,43E-02 | 8,43E+00 |
| Electricité ⁴ | kWh | 3,33E-02 | 7,52E-05 | 1,04E-02 | | 1,67E-04 | 4,39E-02 | 4,39E+00 |

¹ Les valeurs sont exprimées pour l'Unité Fonctionnelle c'est-à-dire par mètre carré de mur et par an.

² Les valeurs sont exprimées pour un mètre carré de mur pour toute la durée de vie.

³ Du fait du choix d'affichage des seules valeurs supérieures à 10⁵, pour certaines lignes, le « Total Cycle de Vie » peut être supérieur à la somme des valeurs affichées pour les différentes étapes (le « Total Cycle de Vie » ayant bien été effectué en considérant toutes les valeurs).

⁴ La consommation d'électricité est déjà comptabilisée dans les flux énergétiques précédents (Énergie primaire totale, Énergie Renouvelable...).

Exemples extraits de la FDES « Murs en maçonnerie de blocs en béton » produite par la fédération de l'industrie du béton.

4.4 Comparaison de plusieurs solutions à partir de FDES.

A partir des FDES, il est possible de comparer plusieurs solutions techniques, ou plusieurs niveaux de performance énergétique d'un bâtiment selon l'isolation thermique. La principale difficulté réside dans la comparaison de grandeurs caractérisées par des unités très diverses (kg, m³, MJ, équivalent de CO₂, etc...). Une solution pratique consiste à utiliser un diagramme en étoile (ou radar) qui permet de représenter des grandeurs avec des unités différentes, particulièrement indiqué pour une ACV.

L'importance donnée à chaque axe du diagramme est arbitraire. On pourra considérer par exemple que l'énergie grise est une donnée plus ou moins importante que l'acidification atmosphérique selon l'importance relative que l'on donne à l'impact de ces deux éléments.

Une autre difficulté consiste à recenser et quantifier l'ensemble des matériaux constituant l'ouvrage étudié. Des logiciels spécialisés permettent de réaliser ce genre d'étude en intégrant également la consommation d'énergie au cours de l'exploitation du bâtiment. La figure ci-contre montre à titre d'exemple, la comparaison de trois solutions d'isolation thermique pour une maison individuelle. On peut constater que l'impact global du bâtiment diminue lorsque l'on améliore l'isolation thermique et que la réduction d'impact est différente selon l'axe considéré.

