

# Introduction à l'analyse de cycle de vie

Les matériaux de construction



Adélaïde FERAILLE

# Applications au domaine de la construction

- Préoccupations environnementales
- Haute Qualité Environnementale
- Norme NF 01-010 - > EN 15804
- Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire - > EPD
- Un exemple : le ciment

# Préoccupations environnementales

- Objectifs : respecter les accords de Kyoto et Facteur 4  
L'industrie cimentière est responsable de 5% des émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale.  
Le secteur du bâtiment est responsable de 23% des émissions de CO<sub>2</sub> nationales
- Amélioration du bâti  
Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (DEPEB)  
HQE  
Bâtiment à énergie positive  
Label BBC Effinergie (objectif 50kwh/m<sup>2</sup>/an, mise en vigueur 2012)  
Bâtiment BePos obligatoire en 2020

- **BREEAM BRE Environmental Assessment Method**
  - méthode d'évaluation de la performance environnementale des bâtiments développée par le Building Research Establishment (BRE), créée en 1990 mais évolutions régulières pour prendre en compte l'évolution de la réglementation et se décliner en plusieurs versions selon les types de bâtiments
  
- **LEED : *Leadership in Energy and Environmental Design***
  - système nord-américain de standardisation créé par le US Green Building Council en 1998. Un bâtiment peut atteindre quatre niveaux : certifié, argent, or et platine.
  - Critères d'évaluation : efficacité énergétique, efficacité de la consommation d'eau, efficacité du chauffage, utilisation de matériaux de provenance locale et réutilisation de leur surplus.
  - LEED est aujourd'hui le système d'évaluation environnementale des bâtiments le plus utilisé au monde, et le modèle sur lequel se basent la plupart des nouveaux autres systèmes. En plus de viser la diminution des ressources utilisées par le secteur de la construction, il a comme objectif de sensibiliser les communautés face à l'environnement.

## EN 15804 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclaration environnementale sur les produits

- réchauffement climatique
- appauvrissement de la couche d'ozone
- acidification des sols et de l'eau (atmosphérique)
- eutrophisation
- formation d'ozone photochimique
- épuisement des ressources abiotiques – éléments
- épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles

# Fiche de déclaration environnementale et sanitaire FDES

Ensemble des éléments résultant d'une ACV regroupant les impacts d'un produit ou d'un système ainsi que les informations sanitaires liées à son utilisation

# Un exemple de FDES : le Béton Prêt à l'Emploi

- Unité Fonctionnelle
- Définition : Assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) pour un bâtiment de type R+4 ou plus sur  $1\text{m}^2$  de paroi, d'épaisseur 15cm, pendant une annuité, tout en assurant une isolation acoustique (53dB additive à celle d'un doublage) et une isolation thermique (résistance thermique de  $0.075\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  additive à celle d'un doublage)

- Masse de produit nécessaire pour l'UF
  - Quantité de produit contenue pour une DVT de 100 ans : fonction assurée par un mur en BPE armé de dimension 0,15m x 1m x 1m de  $R_c = 25\text{MPa}$
  - Produit : mur en béton BPS C 25/30 XF1 fabriqué avec un liant ciment CEM II. 0,15 m<sup>3</sup> (345kg) de béton sont nécessaires à la mise en œuvre d'1 m<sup>2</sup> de mur. Le flux de référence est 0,15 m<sup>3</sup> de produit/100 ans de produit (0,0015m<sup>3</sup>).
  - Produit complémentaire : 30kg de ferrailage par m<sup>3</sup> de béton.



# Principaux résultats

| N° | Impact environnemental  | Valeur - Unité  |
|----|---|---|
| 1  | Consommation de ressources énergétiques<br>Energie primaire totale<br>Energie renouvelable<br>Energie non renouvelable        | 4,52 MJ<br>0,16 MJ<br>4,36 MJ                             |
| 2  | Epuisement des ressources naturelles (ADP)  | 0,0067 kg   |
| 3  | Consommation d'eau  | 2,48 l  |
| 4  | Déchets valorisés<br>Déchets éliminés<br>Déchets dangereux<br>Déchets non dangereux<br>Déchets inertes<br>Déchets radioactifs | 1,5 kg<br>0,00042 kg<br>0,012 kg<br>2,11 kg<br>3,3 E-5 kg |
| 5  | Changement climatique   | 0,46 kg éq CO2  |
| 6  | Acidification atmosphérique   | 0,0016 éq SO2   |
| 7  | Pollution de l'air  | 16 m3   |
| 8  | Pollution de l'eau  | 20 m3   |
| 9  | Destruction de la couche d'ozone stratosphérique  | 0kg CFC éq R11  |
| 10 | Formation d'ozone photochimique   | 1,8 E-4 kg éq éthylène                                    |

# Comparaisons

| N° | Impact environnemental                           | Ordre de grandeur  |
|----|--|--|
| 1  | Consommation de ressources énergétiques          | 5 jours d'utilisation de l'automobile de la famille        |
| 2  | Epuisement des ressources naturelles (ADP)       | 25 jours d'utilisation de l'automobile de la famille       |
| 3  | Consommation d'eau                               | 1 membre de la famille pendant 1/2 journée                 |
| 4  | Déchets solides                                  | 4 jours de production de déchets d'un membre de la famille |
| 5  | Changement climatique                            | 7 jours d'utilisation de l'automobile de la famille        |
| 6  | Acidification atmosphérique                      | 17km d'un camion de 24t chargé                             |
| 7  | Pollution de l'air                               | 18km d'un camion de 24t chargé                             |
| 8  | Pollution de l'eau                               | 12km d'un camion de 24t chargé                             |
| 9  | Destruction de la couche d'ozone stratosphérique |  |
| 10 | Formation d'ozone photochimique                  | 13km d'un camion de 24t chargé                             |

## Quelques commentaires

- Emissions dans l'air :
  - CO<sub>2</sub> : 0,46 kg émis  
production (68%),  
mise en œuvre (25%),  
fin de vie (5%)  
transport (2%)
  - A l'étape de la production :  
Production de ciment 88%  
Production des granulats 6%  
Transport amont 6%
  - COV : 0,0018 g émis à l'étape de production (99%)

- Vie en œuvre : en conditions normales d'utilisation le mur en BPE ne nécessite aucune maintenance.
- Fin de vie : 40 % des bétons déconstruits sont recyclés

# Le cas du béton : comment répond-il aux exigences environnementales

- exemple de Ciments « vert »

# Un exemple : le ciment

## Process de fabrication du clinker Portland ou comment agir sur la décarbonatation ?

- Produire 1 tonne de clinker Portland émet 815 kg de CO<sub>2</sub> et consomme en Amérique du Nord 4.2 GJ [Gartner, 2004].
- La consommation d'énergie lié au processus de clinkerisation varie beaucoup en fonction du type d'énergie utilisé (électrique, hydraulique, nucléaire,...) et de la qualité des fours.
- La majeure partie des émissions de CO<sub>2</sub> est due à la décarbonatation de la chaux pendant la clinkérisation. La répartition des émissions donnée par [Capmas, 2003] :
  - 27% combustibles.
  - 7% combustibles de substitution.
  - 5% biomasse.
  - 61% décarbonatation de la chaux.

# Emissions de CO<sub>2</sub> dues aux matières premières

- Le clinker Portland clinker est composé d'alite C<sub>3</sub>S ((CaO)<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub>), de belite C<sub>2</sub>S ((CaO)<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub>), d'aluminoferrite tetracalcium C<sub>4</sub>AF ((CaO)<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et d'aluminate tricalcium C<sub>3</sub>A ((CaO)<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).
- La clinkérisation de la belite a lieu à 1250°C :  
$$2 \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 2 \text{CO}_2$$
, production d'une tonne de belite : 511 kg de CO<sub>2</sub> émis.
- La clinkérisation de la belite a lieu à 1450°C.  
$$3 \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_5 + 3 \text{CO}_2$$
, production d'une tonne d'alite : 579 kg de CO<sub>2</sub> émis

- Réaction de clinkérisation de  $C_3A$  :

$3 CaCO_3 + Al_2O_3 \rightarrow (CaO)_3Al_2O_3 + 3 CO_2$ , production d'une tonne de  $C_3A$  : 489 kg de  $CO_2$  émis

- Réaction de clinkérisation de  $C_4AF$  :

$4 CaCO_3 + Fe_2O_3 + Al_2O_3 \rightarrow (CaO)_4Al_2O_3Fe_2O_3 + 4 CO_2$ ,  
production d'une tonne de  $C_4AF$  : 362 kg de  $CO_2$  émis

- Pour un clinker Portland composé de 60% de  $C_3S$ , 20% de  $C_2S$ , 10% de  $C_3A$  et 10% de  $C_4AF$ , **produire 1 tonne de clinker Portland émet 535 kg de  $CO_2$ .**



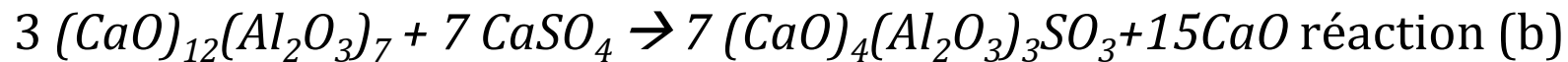
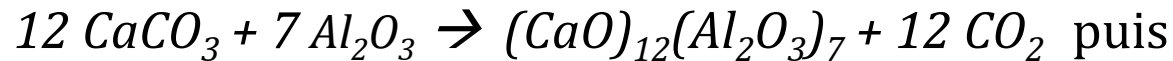
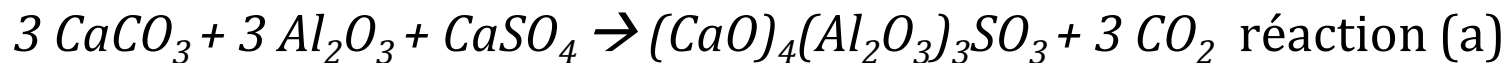
## Pistes pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>

- Utiliser des déchets industriels (phosphogypses, cendres volantes) comme des matières premières pour la fabrication de ciments [Elkhadiri, 2003] (ciments belitique sulfoalumineux).
- Addition de matériaux pouzzolaniques (fumée de silice, metakaolin) [Wong H.S. & Abdul Razak H, 2005 ], [Oliveira L.A.P. et al , 2005 ].
- Utiliser des laitiers de haut fourneaux dans les ciments [Osborne G.] , 1999].
- Clinker sulfoalumineux, expérimenté en Inde [Singh,1997] et déjà utilisé en Chine [Sharp, 1999].

# Le clinker sulfoalumineux

- Le CSA utilisé contient les phases hydrauliques suivantes :  
53% de Yeelite, 18% de belite et 5 % de ferrite

- Yeelite:  $C_4A_3\bar{S}$  obtenue à 1250-1300°C par deux réactions :



- Produire 1 tonne de yeelite en utilisant le process (a), produit 216 kg de CO<sub>2</sub> et 371 kg de CO<sub>2</sub> en utilisant le process (b).

## Synthèse des données environnementales

|   | <b>clinker<br/>Portland</b> | <b>clinker<br/>Sulfoalumineux</b> |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|
| <b>CO<sub>2</sub> émis par tonne de<br/>clinker produit</b>   | <b>535 kg/t</b>             | <b>305 kg/t</b>                   |
| <b>Consommation de<br/>chaleur spécifique<br/>pendant la<br/>clinkérisation<br/>(Popescu et al, 2002)</b> | <b>3.845 GJ/t</b>           | <b>3.305 GJ/t</b>                 |
| <b>Coût énergétique du<br/>broyage (Janotka I.<br/>and Krajci L., 1999)</b>                               | <b>45 to 50 kWh</b>         | <b>20 to 30 kWh</b>               |

# Evolution des résistances en compression

| Bétons | 1 jour<br>(MPa) | 3 jours<br>(MPa) | 7 jours<br>(MPa) | 28 jours<br>(MPa) |
|--------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|
| C1     | 19              | 26               | 40               | 40                |
| C2     | 19              | 29               | 35               | 44                |
| CEM II | 9               | 23               | 31               | 38                |

# Bilan environnemental

| Bétons | CO <sub>2</sub> émis pour la production de clinker | Consommation de chaleur spécifique pendant la clinkérisation |
|--------|--|--|
| C1     | 94.6 kg/m <sup>3</sup>                             | 1.02 GJ/ m <sup>3</sup>                                      |
| C2     | <b>77.5 kg/m<sup>3</sup></b>                       | <b>0.84 GJ/ m<sup>3</sup></b>                                |
| CEM II | 214 kg/m <sup>3</sup>                              | 1.54 GJ/ m <sup>3</sup>                                      |

# Quelques éléments sur le recyclage des matériaux de construction

- Consommation de granulats en France : 413 Mt en 2000 (447 Mt en 2006)
  - bâtiment 85 Mt et génie civil 328 Mt
  - Travaux routiers 283 Mt et béton hydraulique 130 Mt
- Le sable : enquête sur sa disparition (D. Delestrac) matière la plus utilisée après l'eau (15 milliards de tonne extraites par an)
- Le BTP est responsable de 40% des déchets en France
- Déficit entre production et consommation et préservation de l'environnement



recyclage des matériaux

- Contexte réglementaire
  - Contexte environnemental et législatif : Cop 21 (décembre 2015), loi de transition énergétique pour la croissance verte (août 2015) ;
  - Répondre à la directive européenne (2008/98/CE) : 70 % en poids des déchets de construction et de démolition devront être valorisés, recyclés ou réemployés

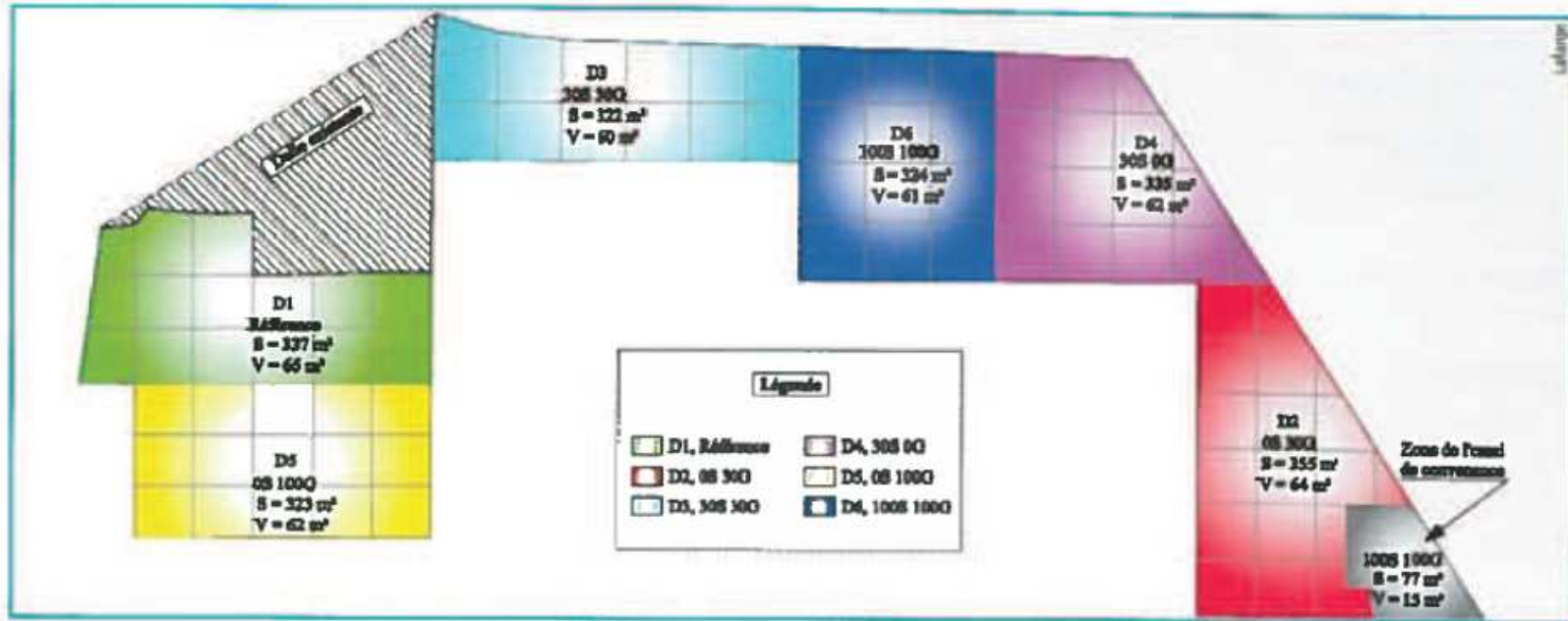
- Actuellement le recyclage des inertes représente 10 % du gisement
- On cherche à le faire progresser
  - Importance du « bien déconstruire » (pas de mélanges de déchets) guide ADEME publié en mars 2003
  - Projet national Recybeton : recyclage complet du béton
    - En France les granulats recyclés sont valorisés dans les travaux routiers mais pas dans les bétons (contrairement aux pays d'Europe du Nord)



- Dans les travaux routiers presque 100% de recyclage pour les couches de roulement
- Obstacles au recyclage :
  - Le coût : traitement
  - Technique : durabilité, malaxage
  - Normatif

# Chantiers expérimentaux

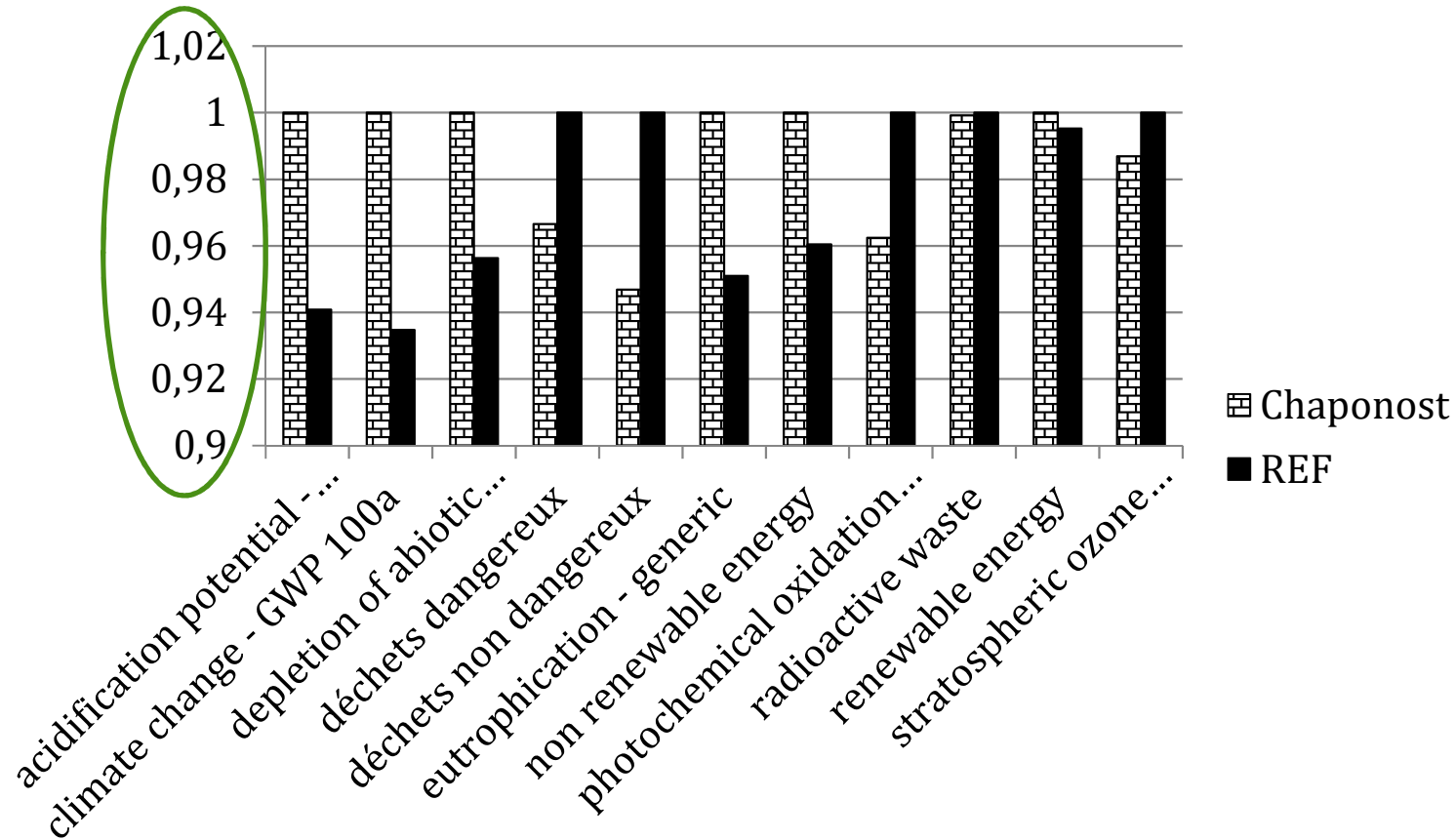
■ C)



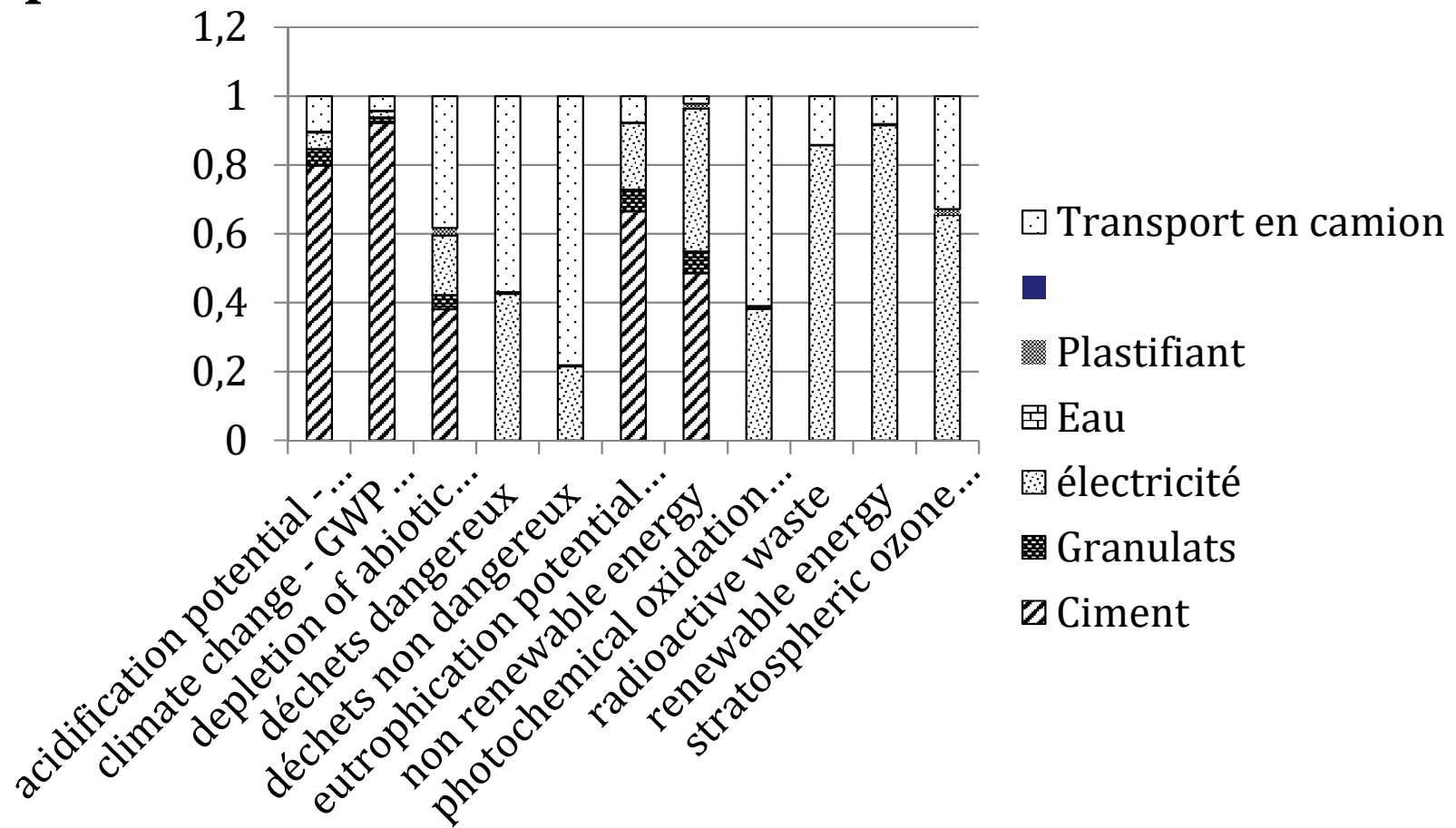
| Constituant (kg/m <sup>3</sup> ) | REF  | 30S - 0G | 0S - 30G | 30S - 30G | 0S - 100G | 100S - 100G |
|----------------------------------|------|----------|----------|-----------|-----------|-------------|
| Granulat                         | 1796 | 1467     | 1437     | 1151      | 772       |             |
| Granulat recyclé                 |      | 235      | 282      | 514       | 778       | 1379        |
| Ciment                           | 302  | 306      | 305      | 308       | 346       | 390         |
| Plastifiant                      | 2,57 | 3,65     | 2,6      | 2,62      | 2,94      | 3,32        |
| Retardateur                      |      | 1,54     | 0,88     | 1,54      | 1,04      | 1,95        |
| Eau                              | 173  | 188      | 178      | 205       | 205       | 260         |

# Chaponost

- Comparaison chantier expérimental et chantier simulé 100% de granulats naturels



- Part de chaque procédé pour le chantier expérimental



- **Recommandations pour inciter à l'utilisation de GR**
  - Compositions optimisées /ciment puisque peu d'écart entre indicateurs d'impact des granulats
  - Associer les granulats recyclés à des granulats naturels locaux
  - Étude de territorialisation -> impact du transport (indicateurs déchets)
- **ACV qui est un outil multicritère pourrait être adapté au contexte de la construction en vue d'une incitation**
  - Indicateurs : Épuisement ressource « granulat » et stockage déchet en amont : peu/pas évalués par une ACV
  - Granulats naturels ou recyclés : part faible des contributions
  - ACV actuelle ne prend pas en compte les effets territoriaux
- **Utilisation de GR ne nuit pas aux ACV**

# PN Recybéton objectifs :

- En France, environ 20 Mt de déchets béton peut être récupéré par son recyclage complet, ce qui permettrait de :
  - Limiter les mises en décharge, voire même les éliminer
  - Diminuer l'utilisation des ressources naturelles dont l'obtention dévient de plus en plus difficile
  - Réduire le transport des matériaux, car la ressource "granulat recyclé" existe proche des lieux de construction, en particulier dans les grands centres urbains
- Pourrait contribuer à une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de la consommation énergétique à condition de ne pas surdoser en ciment