

Bétons écologiques : Impact, évolution, évaluation

Sandrine Marceau

sandrine.marceau@ifsttar.fr

01 81 66 81 21



Sommaire

Contexte

- Contexte environnemental
- Emissions de gaz à effet de serre

① Construction durable : les enjeux

- Matériaux et construction
- Emissions de CO₂ pour la fabrication de ciment
- Energie consommée pour la fabrication de ciment

③ Pistes de recherche et évolutions actuelles

- Substitution/ modification chimique du ciment
- Utilisation de bétons hautes performances
- Utilisation de granulats recyclés
- Charges alternatives

② Evaluation environnementale

- Analyse du cycle de vie : méthodologie
- Application au ciment
- Application au béton
- Matériaux de construction : FDES



Sommaire

Contexte

- Contexte environnemental
- Emissions de gaz à effet de serre

① Construction durable : les enjeux

- Matériaux et construction
- Emissions de CO₂ pour la fabrication de ciment
- Energie consommée pour la fabrication de ciment

③ Pistes de recherche et évolutions actuelles

- Substitution/ modification chimique du ciment
- Utilisation de bétons hautes performances
- Utilisation de granulats recyclés
- Charges alternatives

② Evaluation environnementale

- Analyse du cycle de vie : méthodologie
- Application au ciment
- Application au béton
- Matériaux de construction : FDES

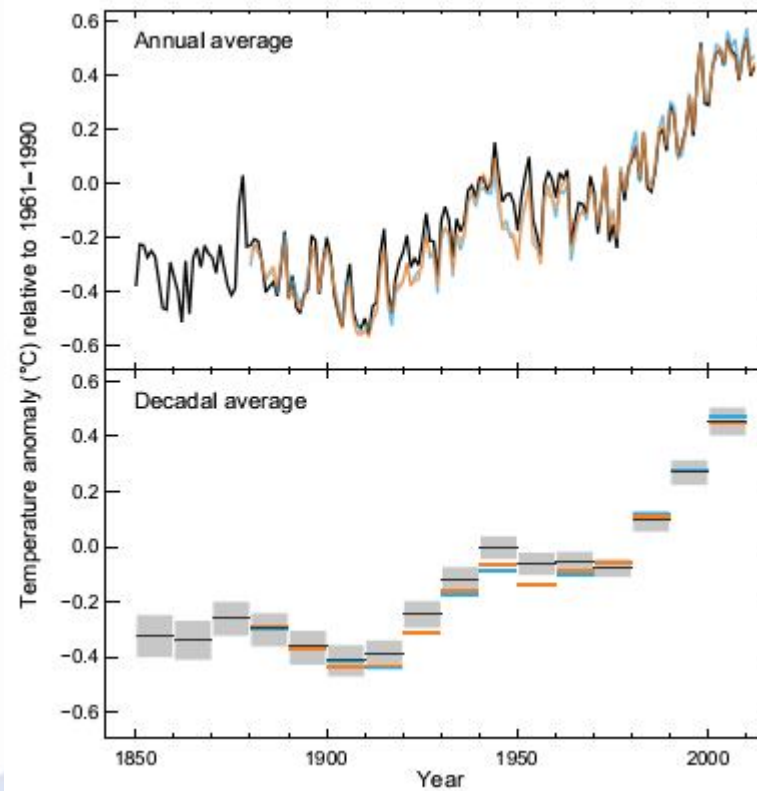


Changement climatique

- Intergovernmental panel on climate change (www.ipcc.ch)
 - Objectif : donner une vision scientifique claire des connaissances sur le changement climatique et ses impacts environnementaux et socio-économiques

Variation des anomalies de températures entre 1850 et 2012

Augmentation de 0,85°C entre 1880 et 2012



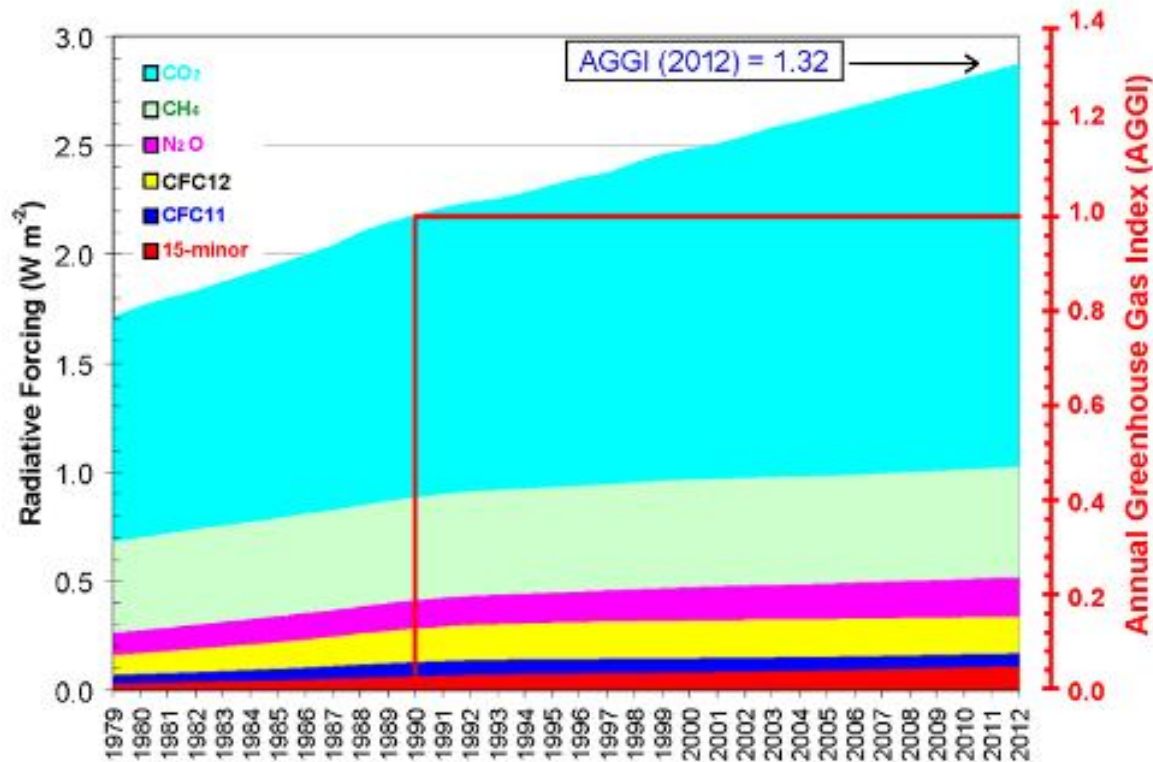
Effet de serre

- Phénomène naturel permettant d'avoir une température terrestre moyenne de 15°C
- Principaux gaz à effet de serre : vapeur d'eau, CO₂ et méthane

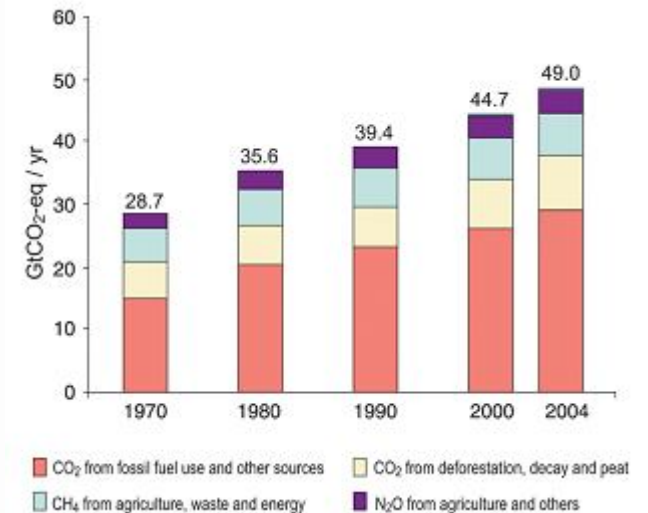


Emissions de CO₂

- Indice annuel d'accumulation des gaz à effet de serre (AGGI)
 - Augmentation de 32% entre 1990 et 2012
 - 475,6 ppm en équivalent CO₂ en 2012



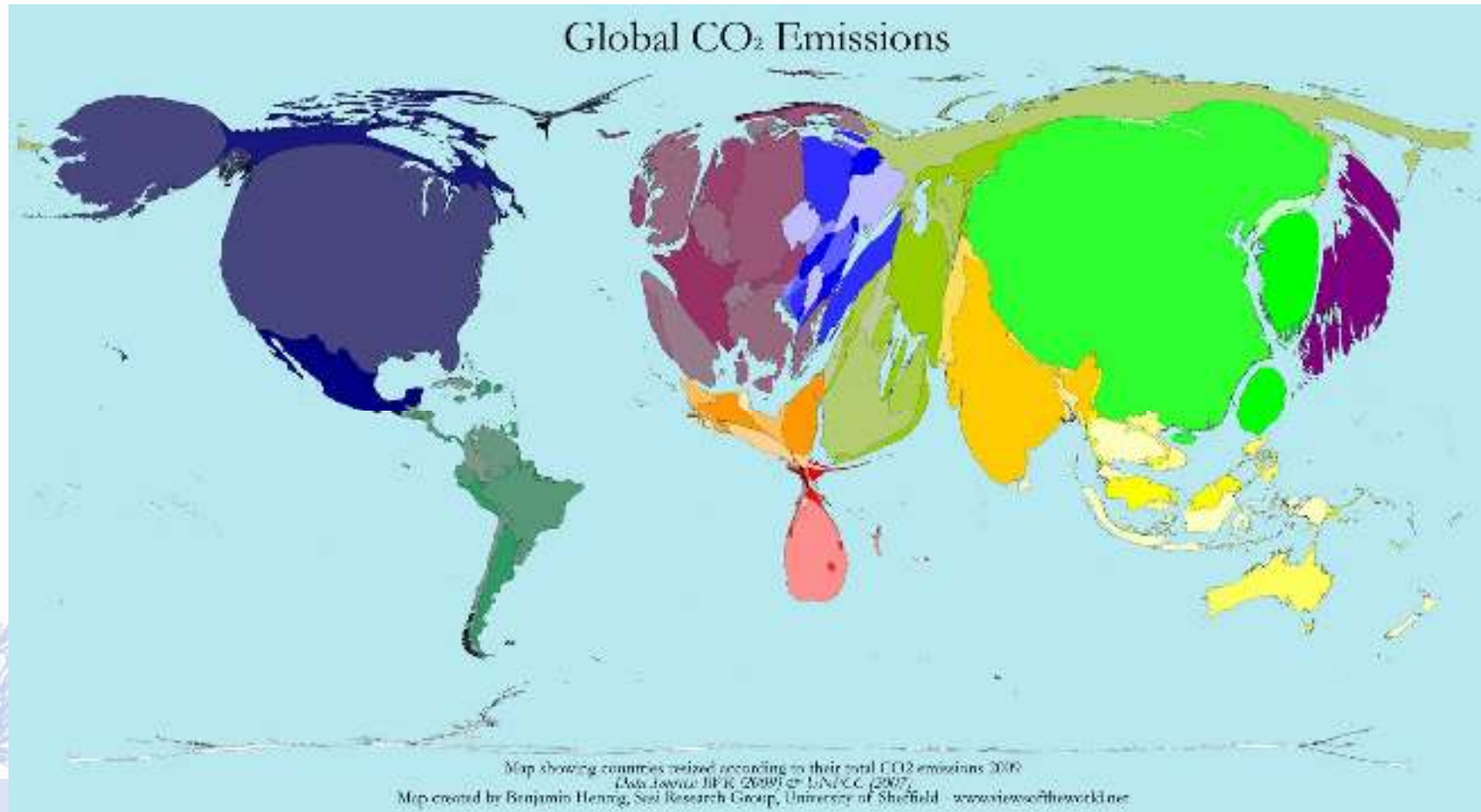
- Principal responsable de la hausse : CO₂ (80%)
- ▶ combustion de carburants fossiles
 - ▶ déforestation



Forçage radiatif : différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique

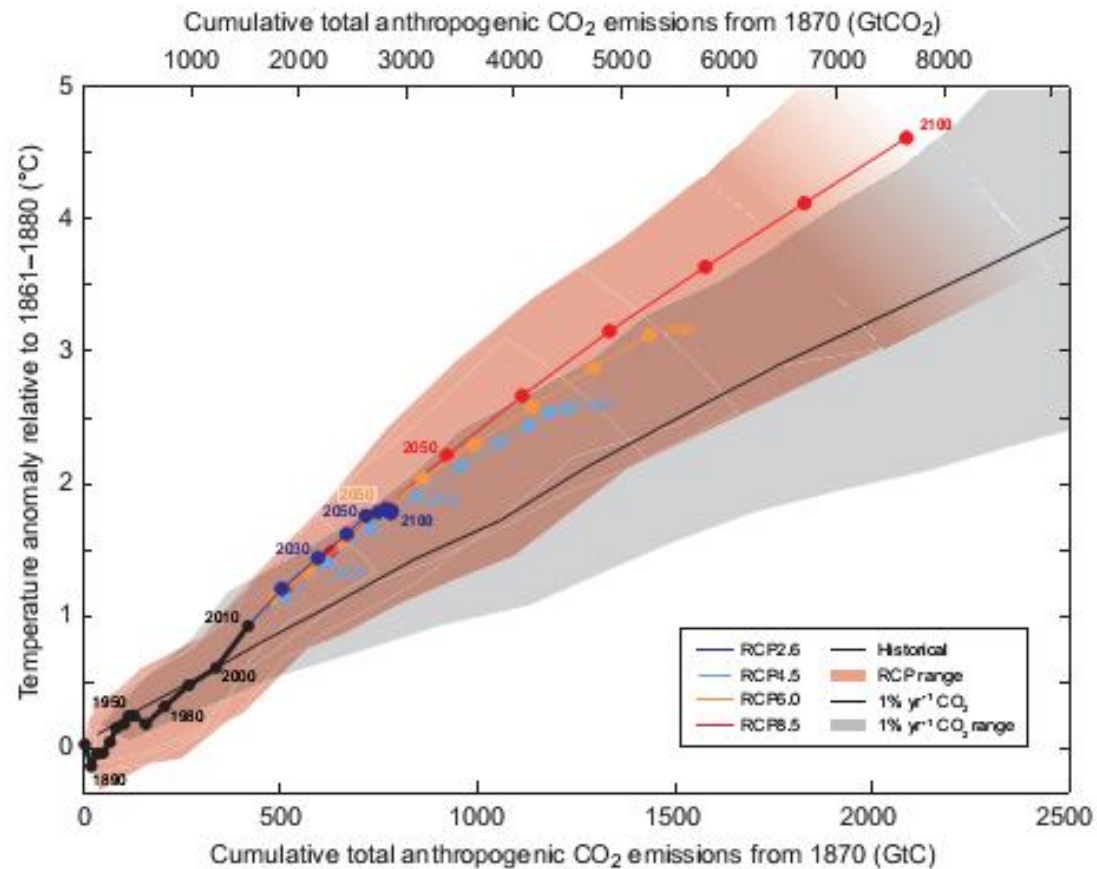
Emissions de CO₂

■ Emissions globales de CO₂



Emissions de CO₂

- Relation entre les émissions de CO₂ anthropomorphiques et la température depuis 1870

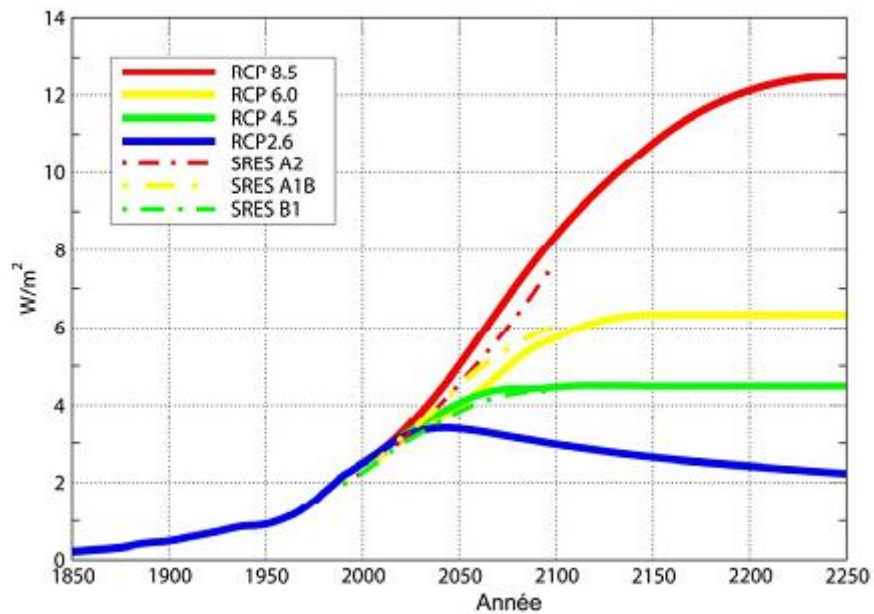


Scénarios d'évolution

■ Quatre hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans les années à venir (période 2000-2100) :

- RCP 2.6 : forçage radiatif de $+2.6 \text{ W/m}^2$ en 2100
- RCP 4.5
- RCP 6
- RCP 8.5

Scénarii d'évolution du forçage radiatif



RCP8.5 : Croissante

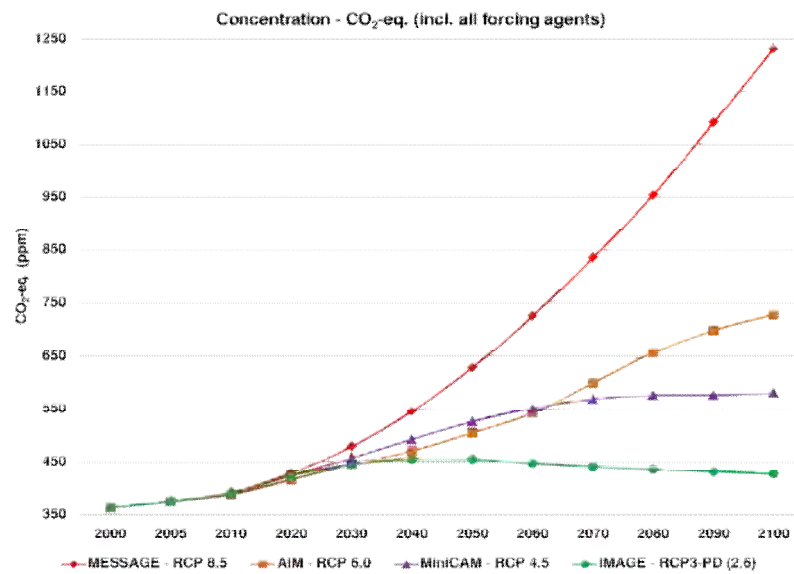
RCP6 : Stabilisation à 6 W/m^2 après 2100

RCP4.5 : Stabilisation à 4.5 W/m^2 après 2100

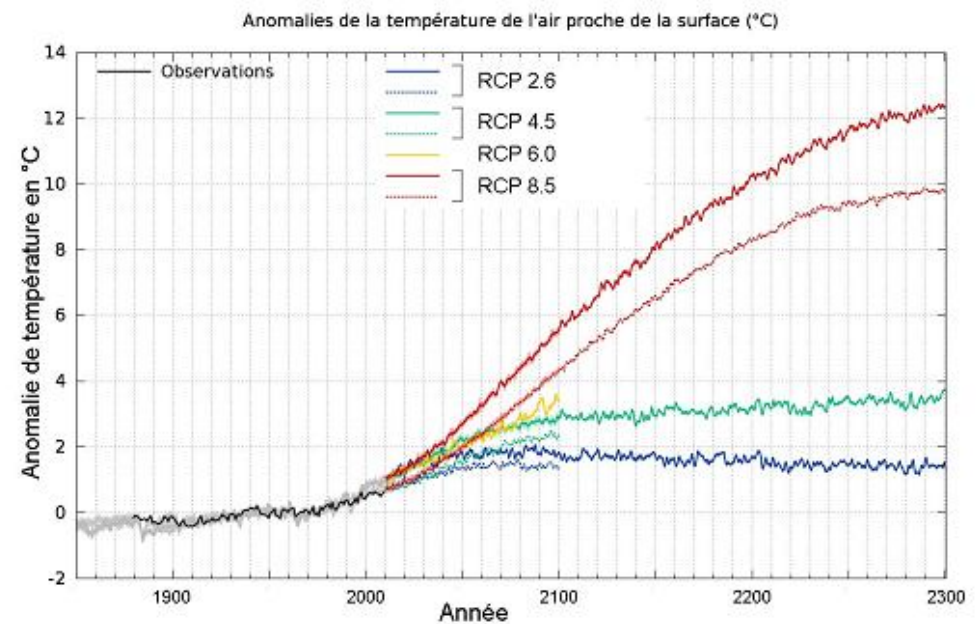
RCP2.6 : Pic avant 2100 puis déclin

Scénarios d'évolution

Concentration en CO₂ dans l'atmosphère en fonction du scénario



Anomalie de température en fonction du scénario



Conséquences socio-économiques

- Déplacements de populations
- Diminution de la production alimentaire
- Réduction de la ressource en eau
- Augmentation du nombre de catastrophes naturelles
- ...



Sommaire

Contexte

- Contexte environnemental
- Emissions de gaz à effet de serre

① Construction durable : les enjeux

- Matériaux et construction
- Emissions de CO₂ pour la fabrication de ciment
- Energie consommée pour la fabrication de ciment

③ Pistes de recherche et évolutions actuelles

- Substitution/ modification chimique du ciment
- Utilisation de bétons hautes performances
- Utilisation de granulats recyclés
- Charges alternatives

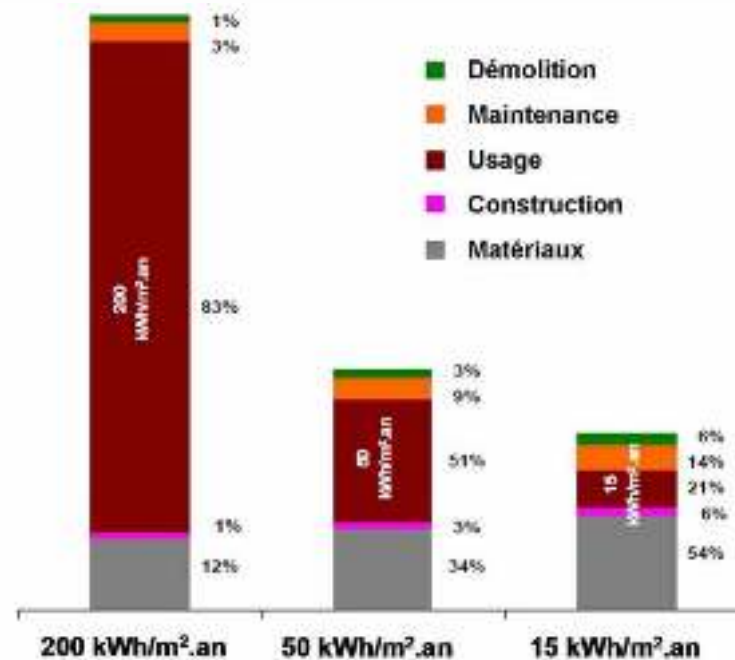
② Evaluation environnementale

- Analyse du cycle de vie : méthodologie
- Application au ciment
- Application au béton
- Matériaux de construction : FDES



Matériaux et construction

- Poids des matériaux de construction sur les impacts environnementaux du bâtiment
 - Part de plus en plus importante des matériaux avec la réduction des consommations énergétiques
 - Place de plus en plus importante des phases de construction et de démolition



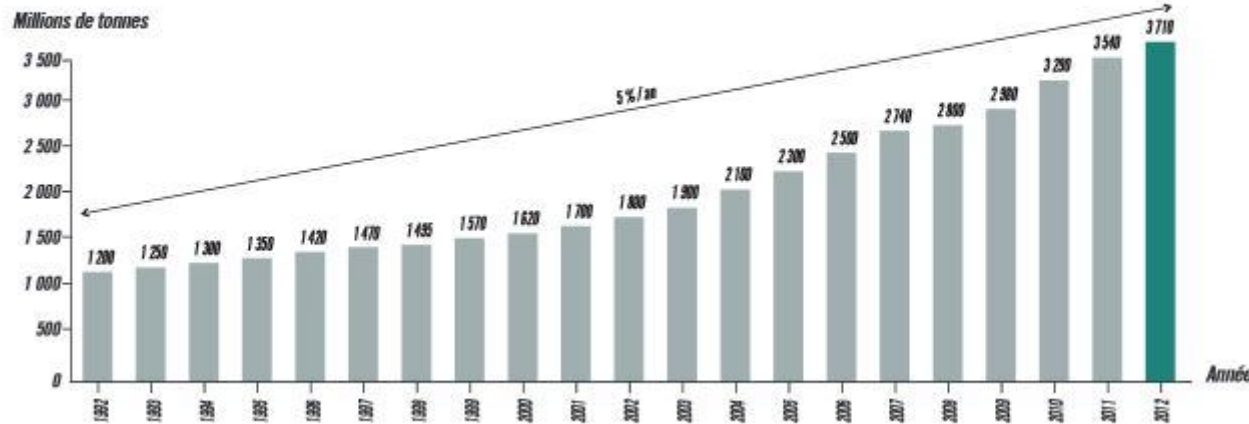
- ▶ Développer des matériaux de construction alternatifs à faible coût environnemental
- ▶ Limiter les consommations énergétiques liées à la phase d'exploitation du bâtiment (qualités thermiques), de construction et de déconstruction

Rôle du béton dans les émissions de gaz à effet de serre

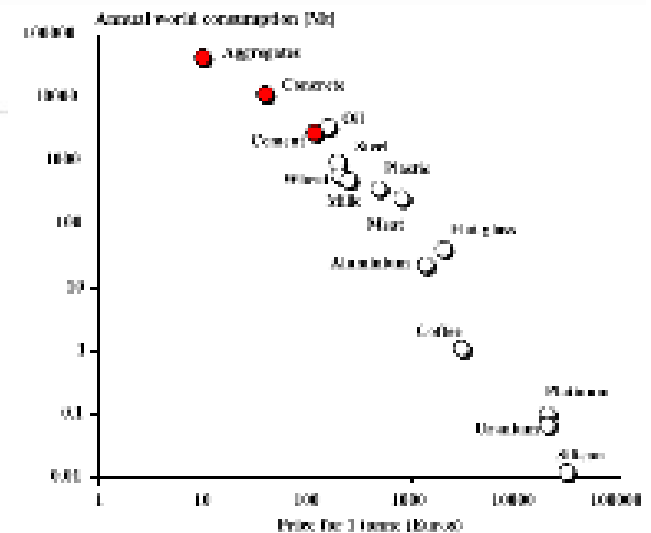
- Béton de ciment : deuxième produit consommé sur Terre après l'eau
- Production mondiale de ciment en 2011 : 3,7 milliards de tonnes (+2,8% 2010)
- 90% du ciment est consommé par les marchés émergents, contre 65% au début des années 1990 (Chine : 56% de la consommation mondiale)
- Production mondiale de béton : 6 milliards de m³, soit 190 m³/s ou 1 m³/an/habitant



ÉVOLUTION DU MARCHÉ MONDIAL DU CIMENT



Analyse Lafarge



CO₂ généré par la production de ciment



■ 2 origines :

■ combustibles utilisés pour cuire les matières premières

■ décarbonatation du calcaire :



■ Fabrication du ciment :

Calcaire

Argile



Mélange de calcaire et d'argile à 1450°C

Clinker



+

Gypse



Produits d'addition



Ciment



Broyage du clinker avec des ajouts : gypse, cendres, laitiers...

CO₂ généré par la production de ciment



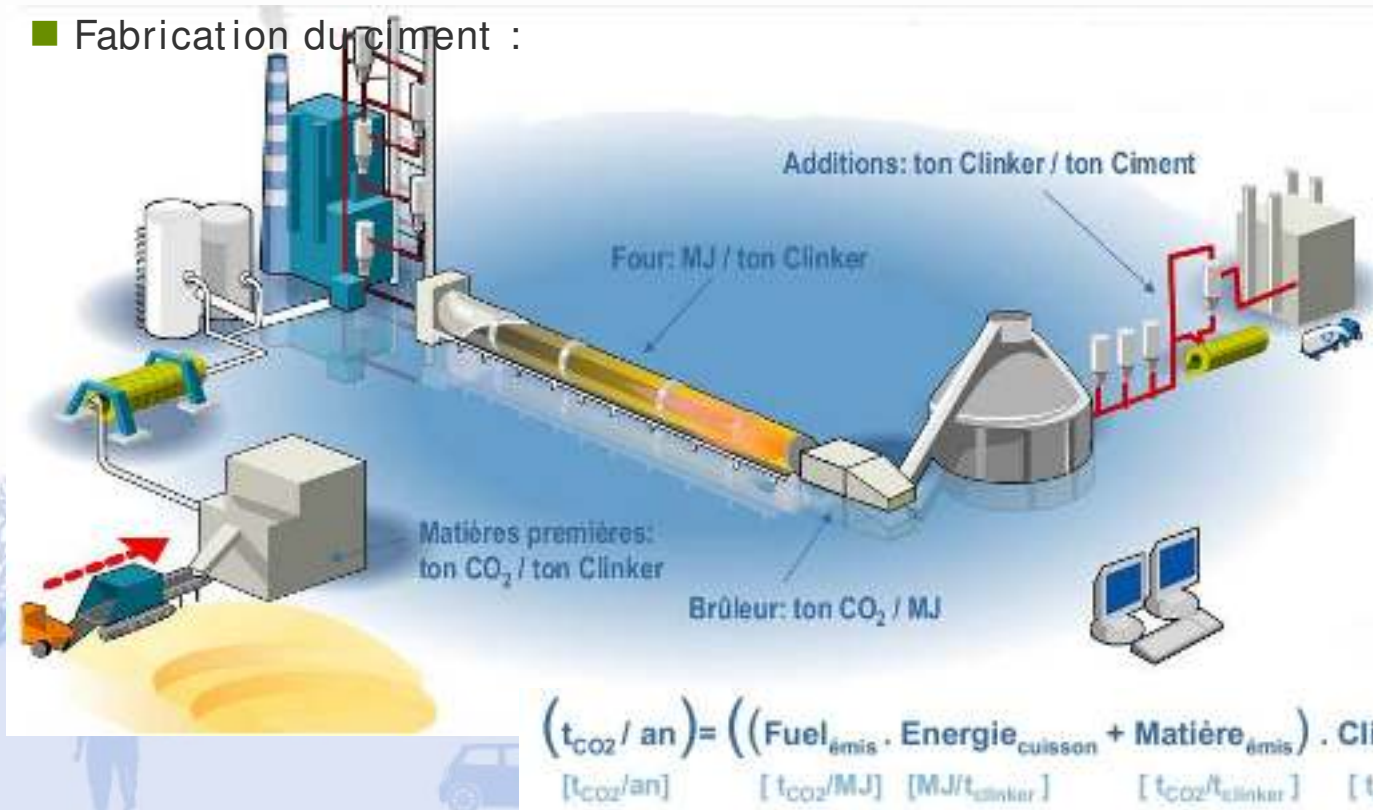
■ 2 origines :

- combustibles utilisés pour cuire les matières premières

- décarbonatation du calcaire :

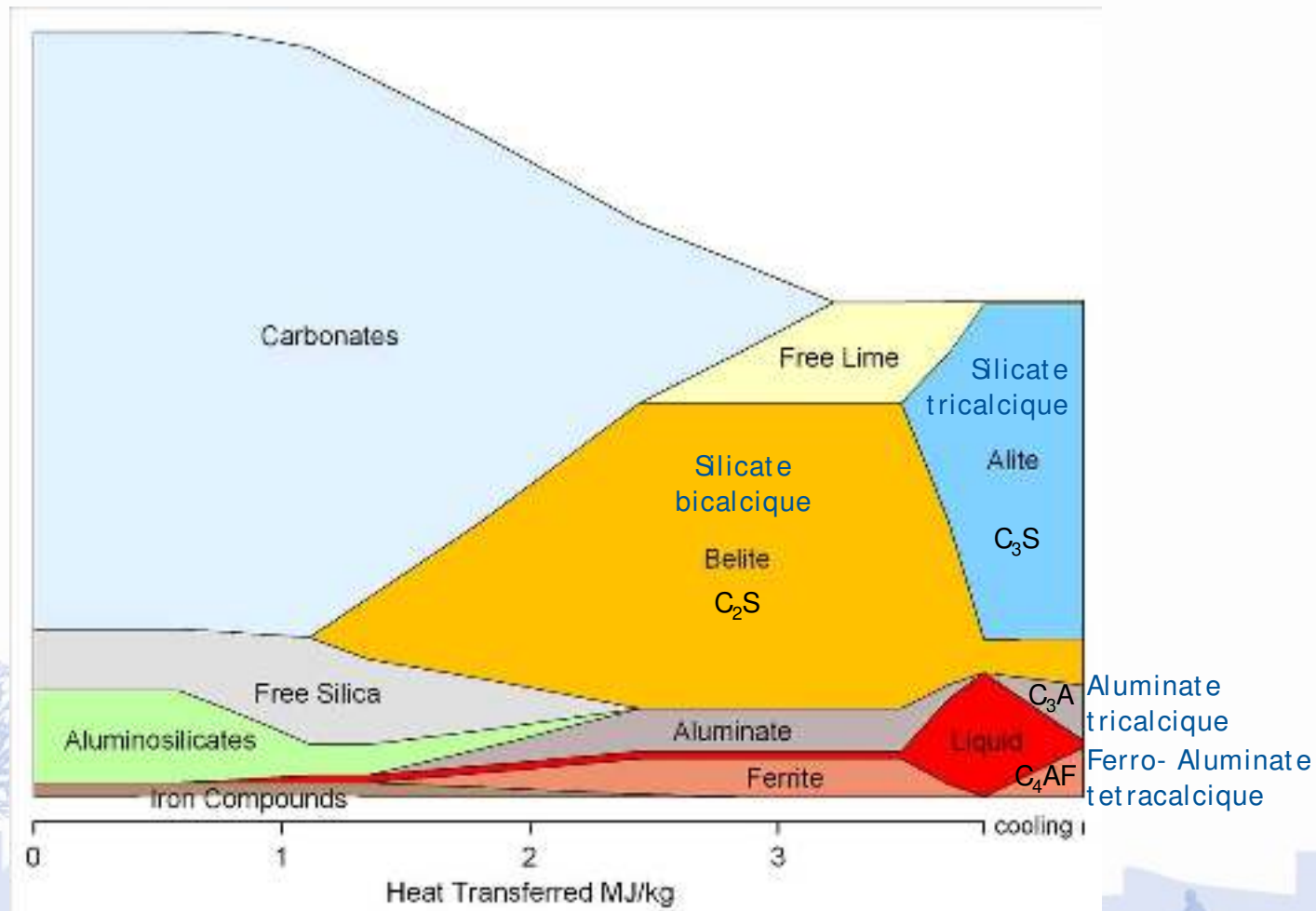


■ Fabrication du ciment :



CO₂ généré par la production de ciment

- Transformation du cru dans le four ➔ 4 phases réactionnelles dans le four



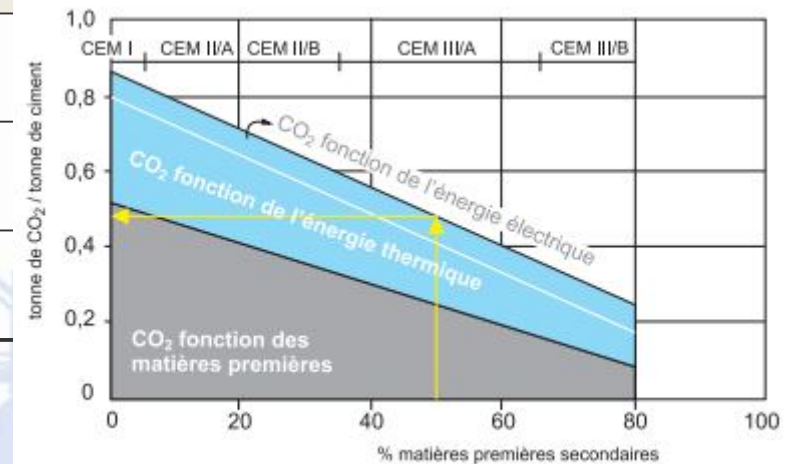
CO₂ généré par la production de ciment

- En moyenne, la production d'une tonne de ciment entraîne l'émission d'une tonne de CO₂
- 5% des émissions globales
- Les émissions de CO₂ sont variables selon le type de ciment :

Pour la production de...	Taux de clinker	CO ₂ généré
1 t de clinker	100 %	835 kg Décarbonatation : 525 kg Combustibles : 310 kg
1 t de ciment CEM I	> 95%	793 à 835 kg
1 t de ciment CEM II	65 à 94%	543 à 785 kg
1 t de ciment CEM III	5 à 64%	42 à 534 kg
1 m ³ / 1 t de béton	CEM I à 100% de clinker	250 kg / 104 kg
1 m ³ / 1 t de béton	CEM III/ B à 34% de clinker	85 kg / 35,4 kg
1 bloc béton de 18 kg	CEM I à 100% de clinker	1 kg

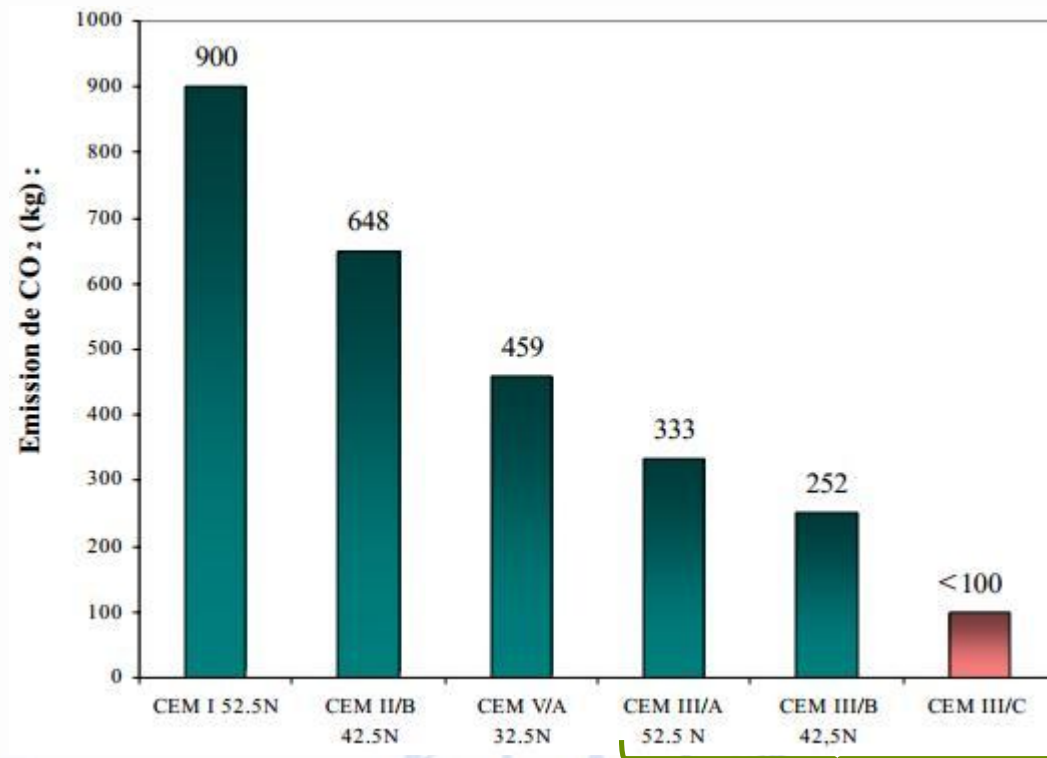
26% de la production de ciment en 2012

50% de la production de ciment en 2012



CO₂ généré par la production de ciment

- En moyenne, la production d'une tonne de ciment entraîne l'émission d'une tonne de CO₂
- 5% des émissions globales
- Les émissions de CO₂ sont variables selon le type de ciment :



Ciments contenant des laitiers

CO₂ généré par la production de ciment

- Composition de différents types de ciment :



Raw material consumption for the production of 1 kg of cement

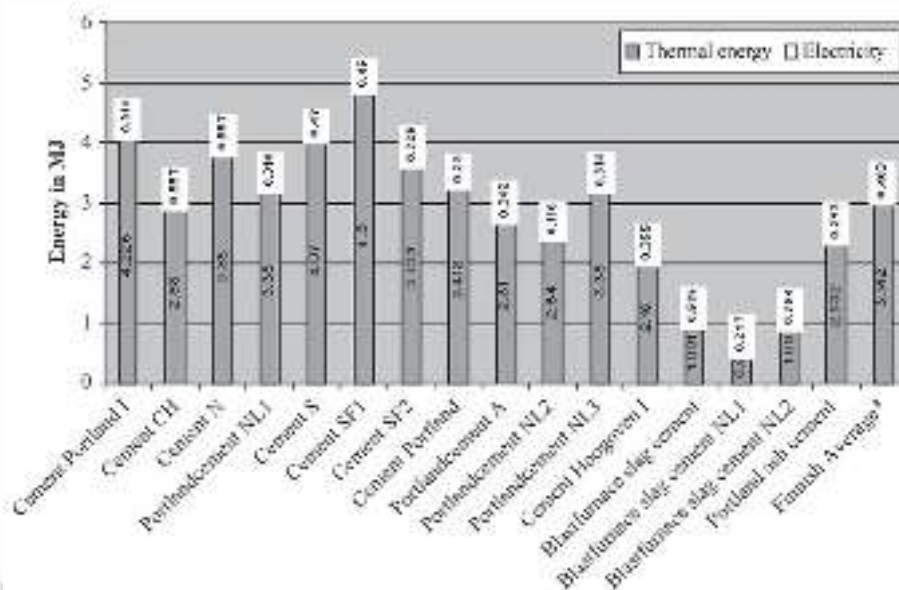
Original nomenclature	Raw material consumption (kg)										
	Clinker production							Cement production			
	Water	Limestone	Limestone	Clay	Chalk	Iron oxides	Other	Clinker	Slag	Fly ashes	Gypsum
Cement Portland I	-	-	1.600	-	-	-	0.270	0.940	-	-	0.060
Cement Portland	-	-	1.610	0.057	0.047	0.019	-	0.950	0.109	0.09	0.050
Cement Hoogoven I	-	-	0.510	-	-	-	0.066	0.300	0.640	-	0.060
Blastfurnace slag cement	-	-	0.425	0.015	0.012	0.005	-	0.250	0.729	0.024	0.050
Portland ash cement	-	-	1.190	0.042	0.035	0.014	-	0.700	0.081	0.317	0.050
Cement CH	-	1.150	0.346	-	-	-	-	-	-	-	0.030
Cement N	-	1.640	-	-	-	-	-	-	-	-	0.050
Portland cement NL1	1.410	1.600	-	-	-	-	-	-	-	-	0.060
Cement S	-	1.360	-	-	0.046	0.009	-	-	-	-	0.046
Cement SF1	-	1.200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cement SF2	-	1.550	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Portland cement A	0.190	1.200	-	-	-	-	0.017	-	0.122	0.027	0.064
Portland cement NL2	1.071	-	1.045	0.028	0.066	0.019	0.047	-	0.095	0.076	0.050
Portland cement NL3	1.325	-	1.316	0.056	0.047	0.014	-	-	0.108	0.089	0.060
Blastfurnace slag cement NL1	0.532	-	0.287	0.007	0.017	0.005	0.025	-	0.700	0.020	0.050
Blastfurnace slag cement NL2	0.423	-	0.420	0.018	0.015	0.004	-	-	0.675	0.285	0.060
'Yleis' cement	-	0.066	-	-	-	0.004	-	0.822	0.067	-	0.053
'Rapid' cement	-	0.042	-	-	-	0.005	-	0.906	0.050	-	0.067
'Pika' cement	-	0.026	-	-	-	0.004	-	0.863	-	-	0.061
'Mega' cement	-	0.030	-	-	-	0.005	-	0.907	-	-	0.058
'SR' cement	-	0.020	-	-	-	0.005	-	0.834	-	-	0.043

A. Josa et al., *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1313-1320

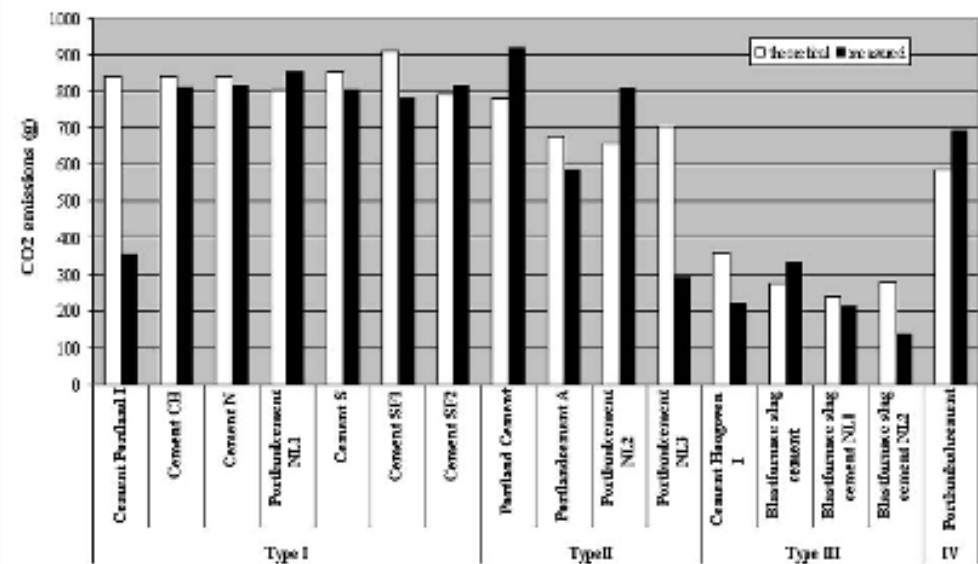
CO₂ généré par la production de ciment

- Influence du type de ciment sur la consommation des fours en énergie et les émissions de CO₂

Comparaison des consommations d'énergies pour produire 1 kg de ciment



Comparaison des émissions de CO₂ totales



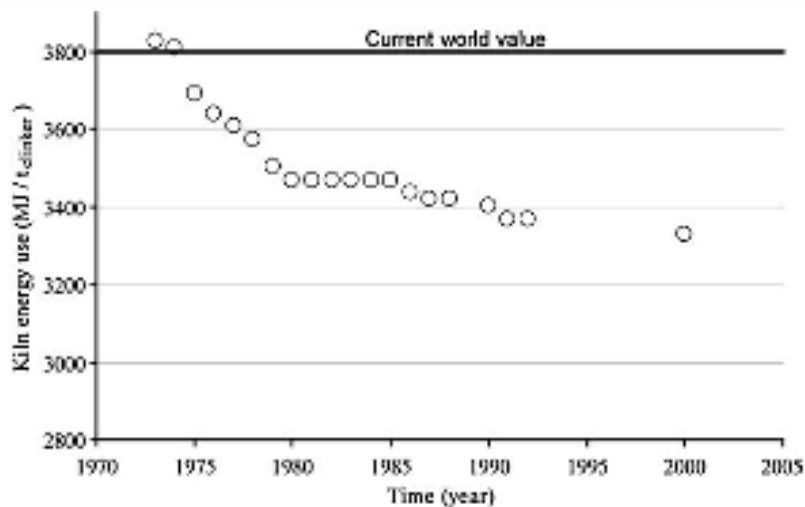
- Autres émissions : SO₂, NO_x, poussières, métaux lourds...

A. Josa et al., Cement and Concrete Research 34 (2004) 1313-1320

Energie consommée pour la production de ciment

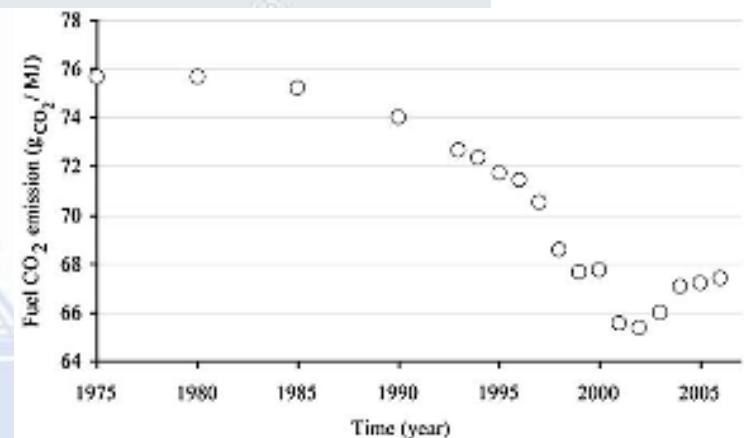
- Différents types de fours, de combustibles...
 - voie humide (la plus ancienne) : 5000-6000 MJ/ t_{clinker}
 - voie semi-humide (dérivée de la voie humide) : 3300-4500 MJ/ t_{clinker}
 - voie sèche (la plus utilisée) : 3100-4200 MJ/ t_{clinker}
 - voie semi-sèche (dérivée de la voie sèche) : 3000 MJ/ t_{clinker}

Evolution de la consommation des fours



Emissions de CO₂ en fonction du combustible

Fuel	Net CO ₂ emission factor (g _{CO2} /MJ)
Petcoke	101
Coal	96
Natural gas	54.2
Used tyres	85
Waste oil	74
Plastic	75
Refused derived fuels	8.7
Animal meal	0
Waste wood	0



G. Habert et al, Cement and Concrete Research 40 (2010) 820-826

Conclusion

- Béton incontournable pour certaines applications
- Béton incontournable pour les développements à venir
- A améliorer :
 - Fabrication : matières premières, substituts
 - Mise en œuvre
 - Destruction : recyclage



Sommaire

Contexte

- Contexte environnemental
- Emissions de gaz à effet de serre

① Construction durable : les enjeux

- Matériaux et construction
- Emissions de CO₂ pour la fabrication de ciment
- Energie consommée pour la fabrication de ciment

③ Pistes de recherche et évolutions actuelles

- Substitution/ modification chimique du ciment
- Utilisation de bétons hautes performances
- Utilisation de granulats recyclés
- Charges alternatives

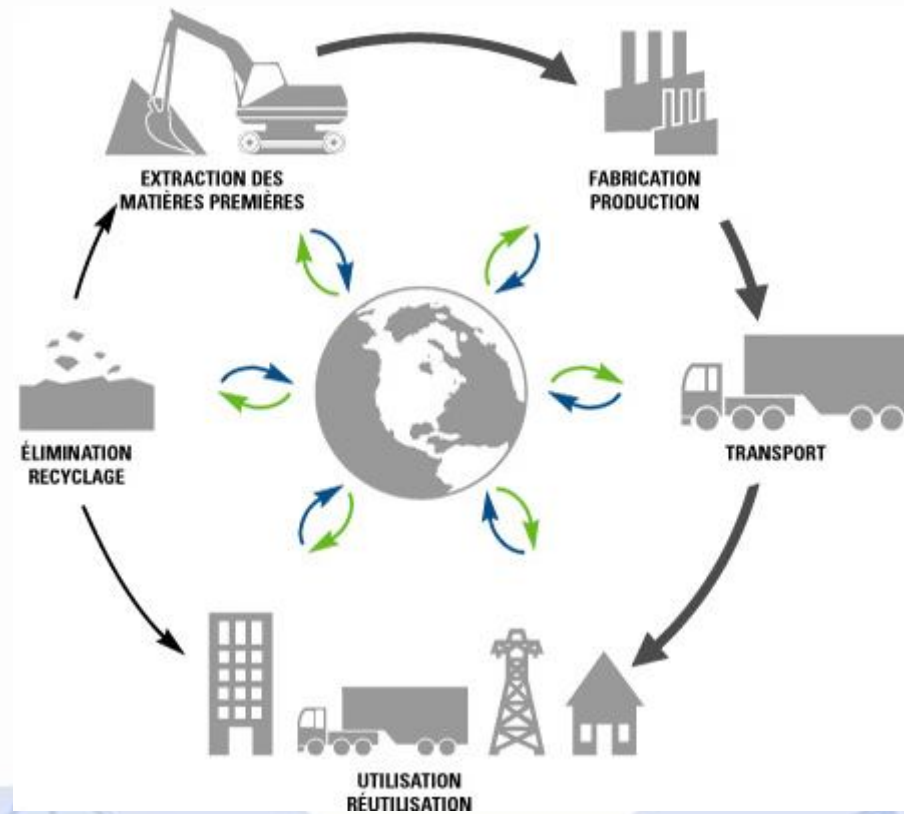
② Evaluation environnementale

- Analyse du cycle de vie : méthodologie
- Application au ciment
- Application au béton



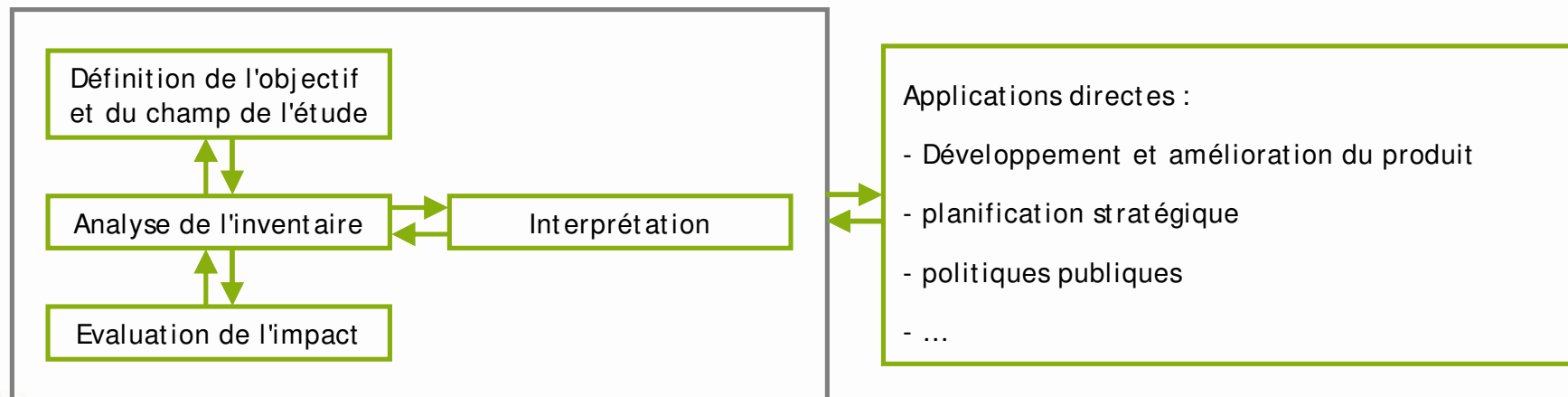
Evaluation environnementale

- Mesure de l'impact environnemental : **analyse du cycle de vie (ISO 14040)**
 - Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant et sortant à chaque étape du cycle
 - ➔ Impact environnemental par catégorie : épuisement des ressources, impact sur la santé humaine, changements climatiques, impact sur la couche d'ozone, utilisation des terres...



Etapes de l'ACV

- 4 étapes selon la norme ISO 14 040
 - Définition de l'objectif et du champ d'étude
 - Analyse de l'inventaire
 - Analyse de l'impact
 - Interprétation



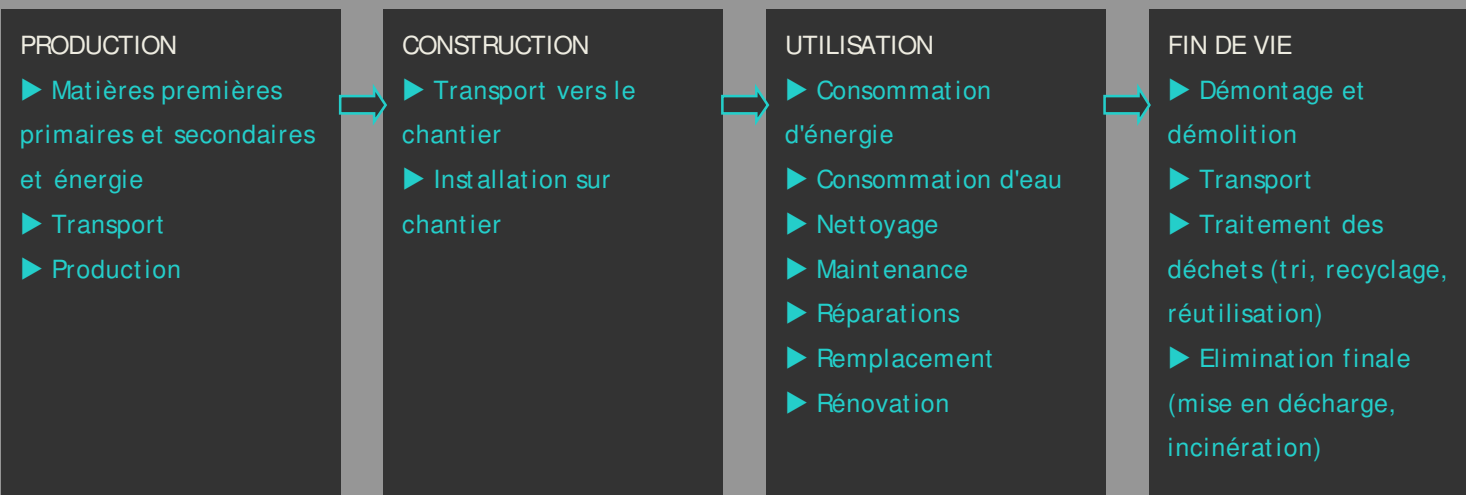
ACV : objectifs et champ d'étude

■ 4 étapes selon la norme ISO 14 040

■ Définition de l'objectif et du champ d'étude

- ▶ Analyse individuelle de l'impact d'un produit ou comparaison de solutions alternatives?
- ▶ Description du système étudié et définition de ses limites
- ▶ Analyse et description transparente de toutes les phases du cycle de vie
- ▶ Définition d'une **unité fonctionnelle** : fonctions et caractéristiques du produit, estimation de la durée de vie

Cycle de vie d'un produit de construction, d'un élément de bâtiment ou d'un bâtiment



ACV : objectifs et champ d'étude

■ 4 étapes selon la norme ISO 14 040

■ Définition de l'objectif et du champ d'étude

▶ Exemples d'unités fonctionnelles :

- ▶ assurer une fonction d'isolation thermique sur 1 m^2 de paroi pour une durée de vie de 60 ans et une résistance thermique de $0.85 \text{ K.m}^2/\text{W}$
- ▶ mur couvert sur 20 m^2 , d'une résistance thermique de $2 \text{ m.K}/\text{W}$ avec une surface peinte sur 98% ne nécessitant pas d'autre coloration pendant 5 ans



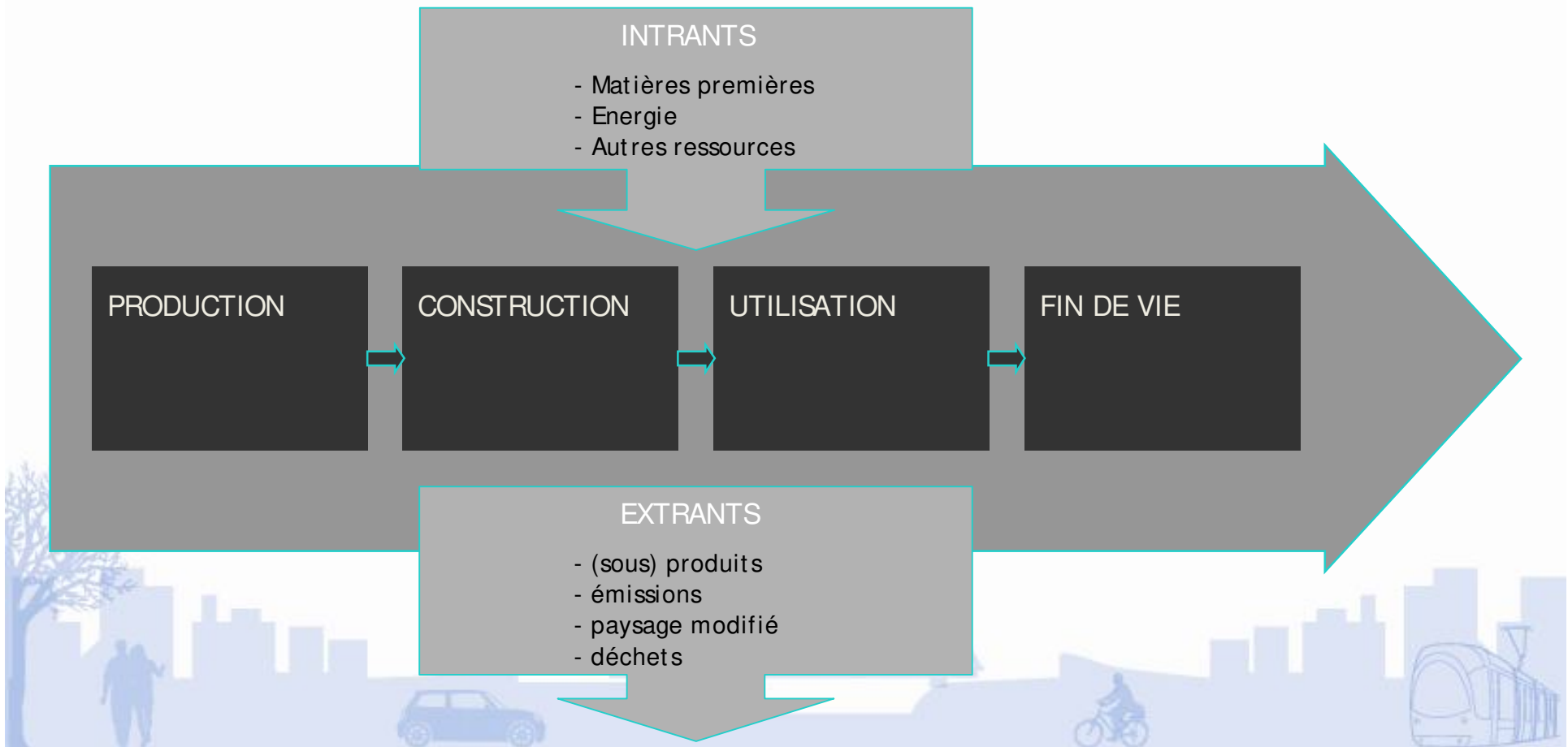
ACV : analyse de l'inventaire

■ 4 étapes selon la norme ISO 14 040

■ Définition de l'objectif et du champ d'étude

■ Analyse de l'inventaire

▶ Compilation et quantification des intrants et extrants au cours du cycle de vie



ACV : analyse de l'impact

■ 4 étapes selon la norme ISO 14 040

- Définition de l'objectif et du champ d'étude

- Analyse de l'inventaire

- Analyse de l'impact

 - ▶ Comprendre et évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels sur l'environnement au cours du cycle de vie

 - ▶ Choix des catégories d'impact

<i>Catégorie d'impact</i>	<i>Indicateur (exemples)</i>	<i>Unité</i>	<i>Description</i>
<i>Impacts environnementaux</i>	Changement climatique	kg CO ₂ équiv.	Emissions de GES : CO ₂ , NH ₄ , N ₂ O, CFC...
	Acidification terrestre et aquatique	kg (SO ₂) ²⁻ equiv	Emissions dans l'air des substances, qui provoquent de la pluie acide (NO _x , SO ₂ , NH ₃ , COV, HCl, ...).
	Eutrophisation	kg (PO ₄) ³⁻ équiv.	Emissions dans l'air et l'eau des substances, qui provoquent un excès de substances nutritives dans les lacs, les rivières et les océans
	Formation d'ozone photochimique (smog)	kg éthène équiv.	Emissions dans l'air des substances, qui causent la production d'ozone troposphérique ou du smog (NO _x , COV, CH ₄ , CO, ...)
	Epuisement de ressources abiotiques, minéraux	kg SB* équiv. SB : Antimoine	
	Epuisement de ressources abiotiques, ressources fossiles	MJ, valeur calorifique nette	

ACV : analyse de l'impact

► Choix des catégories d'impact

<i>Catégorie d'impact</i>	<i>Indicateur (exemples)</i>	<i>Unité</i>
Consommation des matières premières	Utilisation d'énergie primaire renouvelable (sources d'énergie), exclusivement énergie utilisée comme ressource primaire	MJ, valeur calorifique nette
	Utilisation d'énergie primaire non-renouvelable comme ressource primaire	MJ, valeur calorifique nette
	Utilisation de matières secondaires	kg
	Consommation nette d'eau fraîche	m ³
Catégories de déchets	Déchets dangereux	kg
	Déchets non-dangereux	kg
	Déchets radioactifs	kg
Indicateurs complémentaires	Formation de matières particulaires : Emissions dans l'air des particules en suspension inférieures à 10 micromètres	kg PM ₁₀ équiv.
	Ecotoxicité terrestre : Emissions dans le sol et l'air des substances, qui portent (finalement) préjudice aux écosystèmes (flore et faune) dans le sol (p.ex. métaux lourds, pesticides, ...)	kg 1,4 DB équiv. DB = dichloro-benzène
	Transformation du territoire : La transformation et l'occupation par l'homme d'une certaine surface naturelle pendant une certaine période	m ² / an
	Occupation du territoire agricole/ urbain : L'occupation par l'homme d'une certaine surface de terre pendant une certaine période pour l'agriculture/ des buts urbains et les changements du paysage ou de l'espace qui en résultent	m ² / an

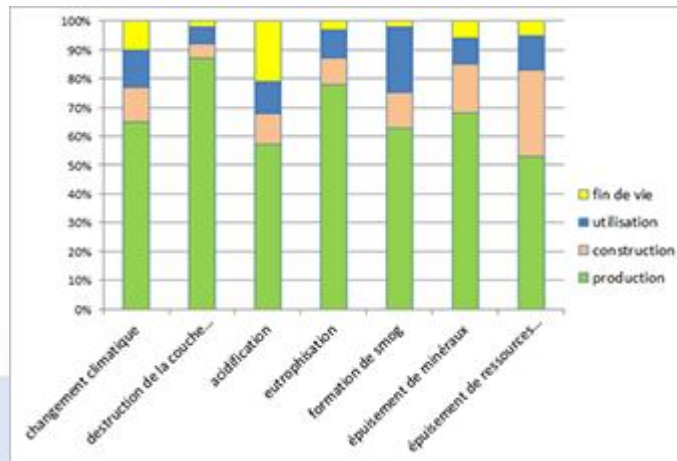
ACV : analyse de l'impact

■ 4 étapes selon la norme ISO 14 040

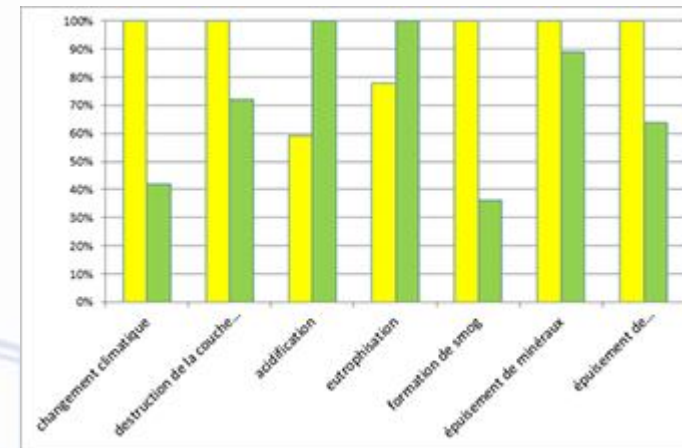
- Définition de l'objectif et du champ d'étude
- Analyse de l'inventaire
- Analyse de l'impact

- ▶ Comprendre et évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels sur l'environnement au cours du cycle de vie
- ▶ Choix des catégories d'impact
- ▶ Conversion des données de l'inventaire en catégories d'impact
- ▶ profil environnemental pour le produit, l'élément ou le bâtiment

Contribution de chaque étape du cycle de vie aux catégories d'impact environnemental



Comparaison des contributions aux différentes catégories d'impact de deux produits



ACV : interprétation

■ 4 étapes selon la norme ISO 14 040

- Définition de l'objectif et du champ d'étude

- Analyse de l'inventaire

- Analyse de l'impact

- **Interprétation**

- ▶ Présentation complète des résultats de l'ACV pour fournir des recommandations

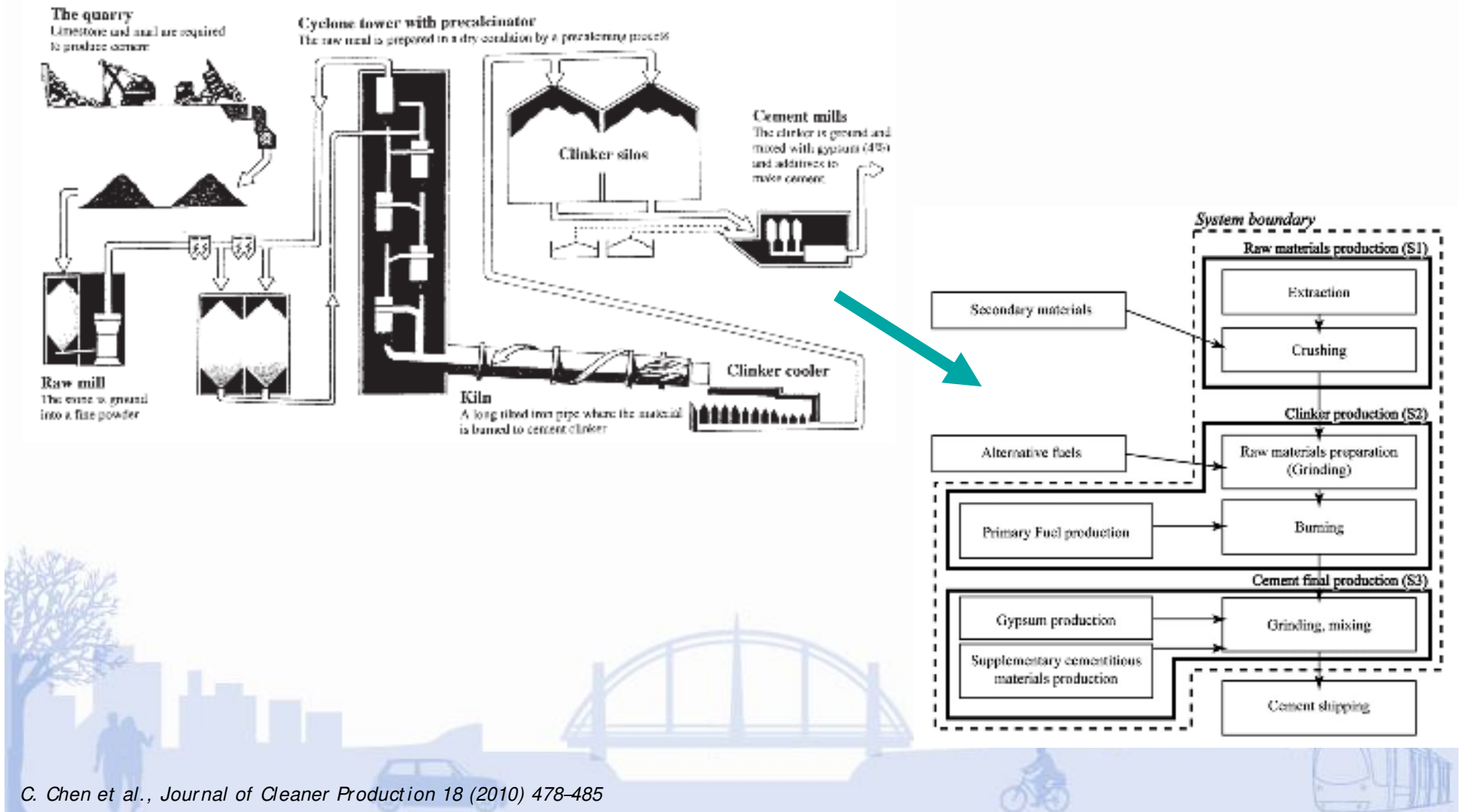
- ▶ Identification des limitations de l'analyse

- ▶ Revue critique de l'ACV : vérification complète et validation de l'ACV par un expert extérieur



Application au cas du ciment

■ Fabrication du ciment : des procédés complexes

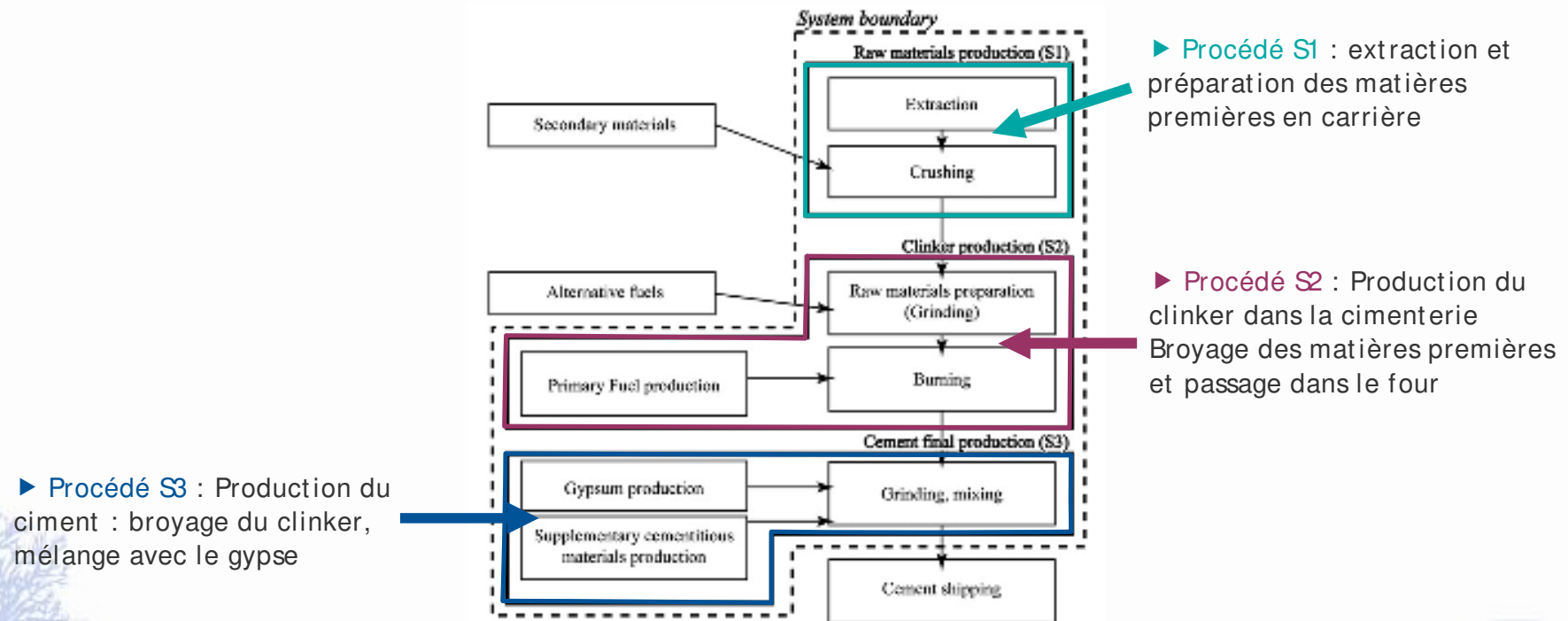


C. Chen et al., *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 478-485

Application au cas du ciment

■ Fabrication du ciment

- 1 Unité fonctionnelle : production d'1kg de ciment de type CEM I (>95%de clinker)
- 2 Définition du système



C. Chen et al., *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 478-485

Application au cas du ciment

■ Fabrication du ciment

③ Utilisation de données génériques (moyennes données par l'ATILH, base de données ECOINVENT..)

Données d'entrée pour 1 kg de ciment

Process (per kg cement)	Raw materials prod.(S1)	Clinker prod.(S2)	Cement final prod.(S3)
Raw materials			
Limestone (kg)	1.22		
Clay (kg)	0.31		
Gypsum (kg)			1×10^{-2}
Water (l)		0.2	
Grinding aids (kg)			2×10^{-4}
Energy			
Hard coal (kg)		9.8×10^{-3}	
Electricity (kWh)		7×10^{-3}	6.5×10^{-2}
Petroleum coke (kg)		4.5×10^{-3}	
Gas (MJ)		2.3×10^{-3}	
Heavy fuel oil (kg)		1.6×10^{-3}	
Light distillates (kg)		1.3×10^{-3}	
Waste (MJ)		1.2	
Transport			
Boat (kg km)		97.7	
Train (kg km)		1.22	
Truck 28 t (kg km)	40.38	13.36	3.12
Cement plant installation			
Rotary kiln (unit)		6.3×10^{-12}	
Rest of cement plant (unit)			5.4×10^{-11}

Substances émises dans l'air pour 1 kg de ciment

Air emissions (kg/kg cement)	This study ^a		ATILH ^b
	Mean	Std	
Chlorine (Cl)	2.9×10^{-6}	5.2×10^{-6}	
Hydrochloric acid (HCl)	8.8×10^{-6}	3.5×10^{-6}	4.0×10^{-6}
Fluorine and inorganic compounds	1.5×10^{-7}	5.7×10^{-8}	1.0×10^{-6}
Benzene (C ₆ H ₆)	3.3×10^{-6}	1.1×10^{-8}	
Carbon monoxide (CO)			1.4×10^{-3}
Methane (CH ₄)			2.0×10^{-5}
Non-methane volatile organic compounds (NMVOC)	4.5×10^{-5}	2.7×10^{-5}	5.0×10^{-5}
Carbon dioxide (CO ₂)	6.9×10^{-1}	1.4×10^{-1}	8.1×10^{-1}
Mercury and derivatives (Hg)	3.4×10^{-8}	2.2×10^{-8}	1.2×10^{-8}
Nitrogen oxides (NO _x) (eq. NO ₂)	1.2×10^{-3}	3.2×10^{-4}	1.5×10^{-3}
Sulphur oxides (SO _x) (eq. SO ₂)	8.2×10^{-4}	4.7×10^{-4}	5.8×10^{-4}
Nitrous oxide (N ₂ O)	9.7×10^{-6}	1.7×10^{-5}	
Ammonia (NH ₃)	7.2×10^{-4}	5.1×10^{-4}	4.7×10^{-5}
Particulates	4.9×10^{-4}		4.0×10^{-5}
Copper and derivatives (Cu)	2.8×10^{-7}	1.7×10^{-9}	3.9×10^{-8}
Manganese and derivatives (Mn)	2.8×10^{-7}	8.8×10^{-8}	4.6×10^{-8}
Nickel and derivatives (Ni)	1.6×10^{-7}	9.7×10^{-8}	8.3×10^{-8}
Zinc and derivatives (Zn)	9.8×10^{-7}	7.5×10^{-7}	1.6×10^{-6}
Antimony (Sb)	1.8×10^{-9}	1.3×10^{-9}	3.9×10^{-9}
Tin (Sn)	7.3×10^{-9}	3.2×10^{-9}	1.7×10^{-9}
Cobalt (Co)	1.4×10^{-8}		1.4×10^{-8}
Cadmium (Cd)	2.6×10^{-8}	1.1×10^{-8}	1.4×10^{-8}
Arsenic (As)	3.2×10^{-8}		8.0×10^{-8}
Chromium (Cr)	6.4×10^{-8}		2.4×10^{-8}
Lead (Pb)	2.2×10^{-7}	1.3×10^{-7}	1.1×10^{-7}
Titanium (Ti)			4.0×10^{-8}
Vanadium (V)			4.6×10^{-8}
Selenium (Se)			1.3×10^{-8}
Tellurium (Te)			1.1×10^{-8}

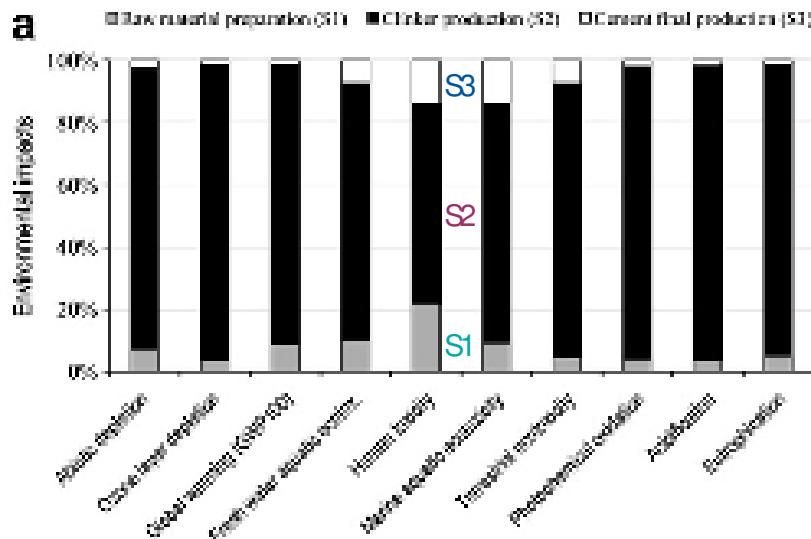
C. Chen et al., Journal of Cleaner Production 18 (2010) 478-485

Application au cas du ciment

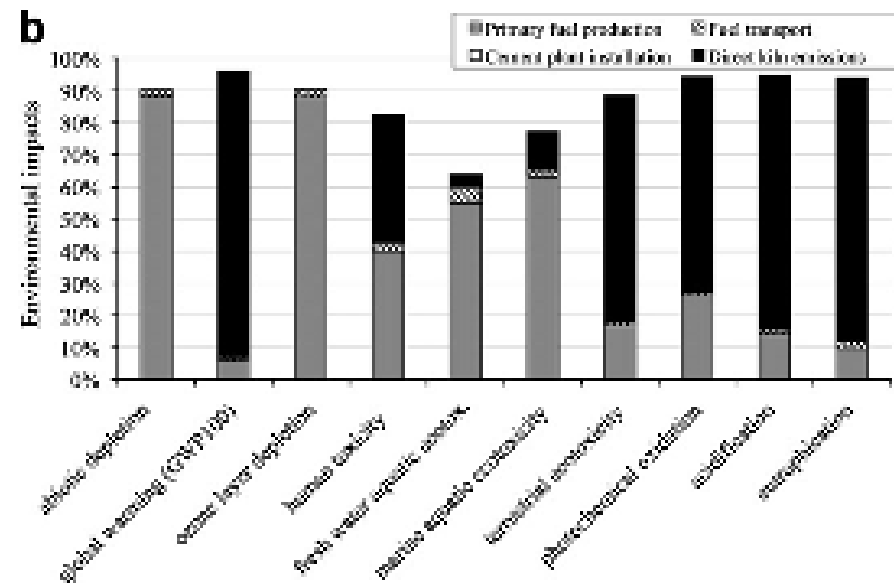
Fabrication du ciment

4 Résultats

Contribution des trois process



Contribution des étapes du process 2



► Le procédé S2 (fabrication du clinker) a une contribution majoritaire

► Contributions majoritaires : émissions directes du four et fabrication des combustibles


► Faible contribution du transport et de l'installation de la cimenterie

C. Chen et al., Journal of Cleaner Production 18 (2010) 478-485

Application au cas du ciment

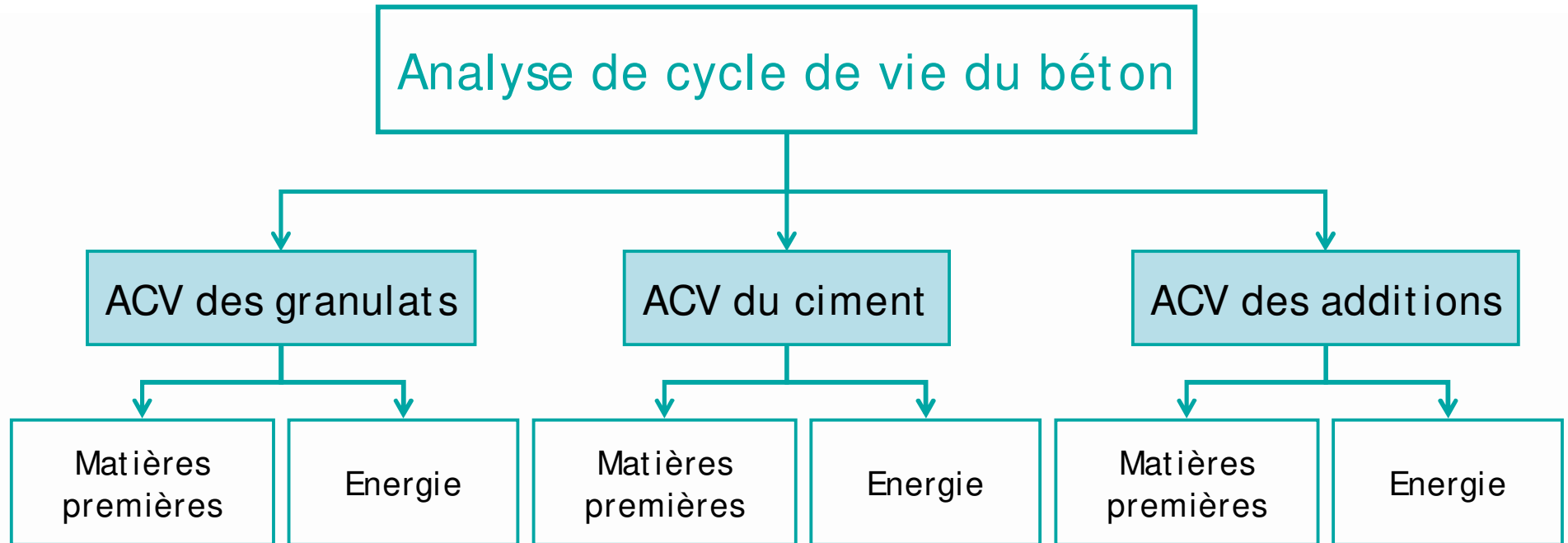
■ Limitations

- ▶ Définition des limites du système : formulations d'hypothèses, possibilité d'oublier une partie de la chaîne de production
- ▶ Disponibilité et pertinence des données
- ▶ Qualité des données liée aux différents modes de fonctionnement des usines
- ▶ Pas de prise en compte de la maintenance de la cimenterie (four et broyage)
- ▶ Données moyennes et globales (disponibilité globale des ressources et non locale)



C. Chen et al., Journal of Cleaner Production 18 (2010) 478-485

Application au cas du béton

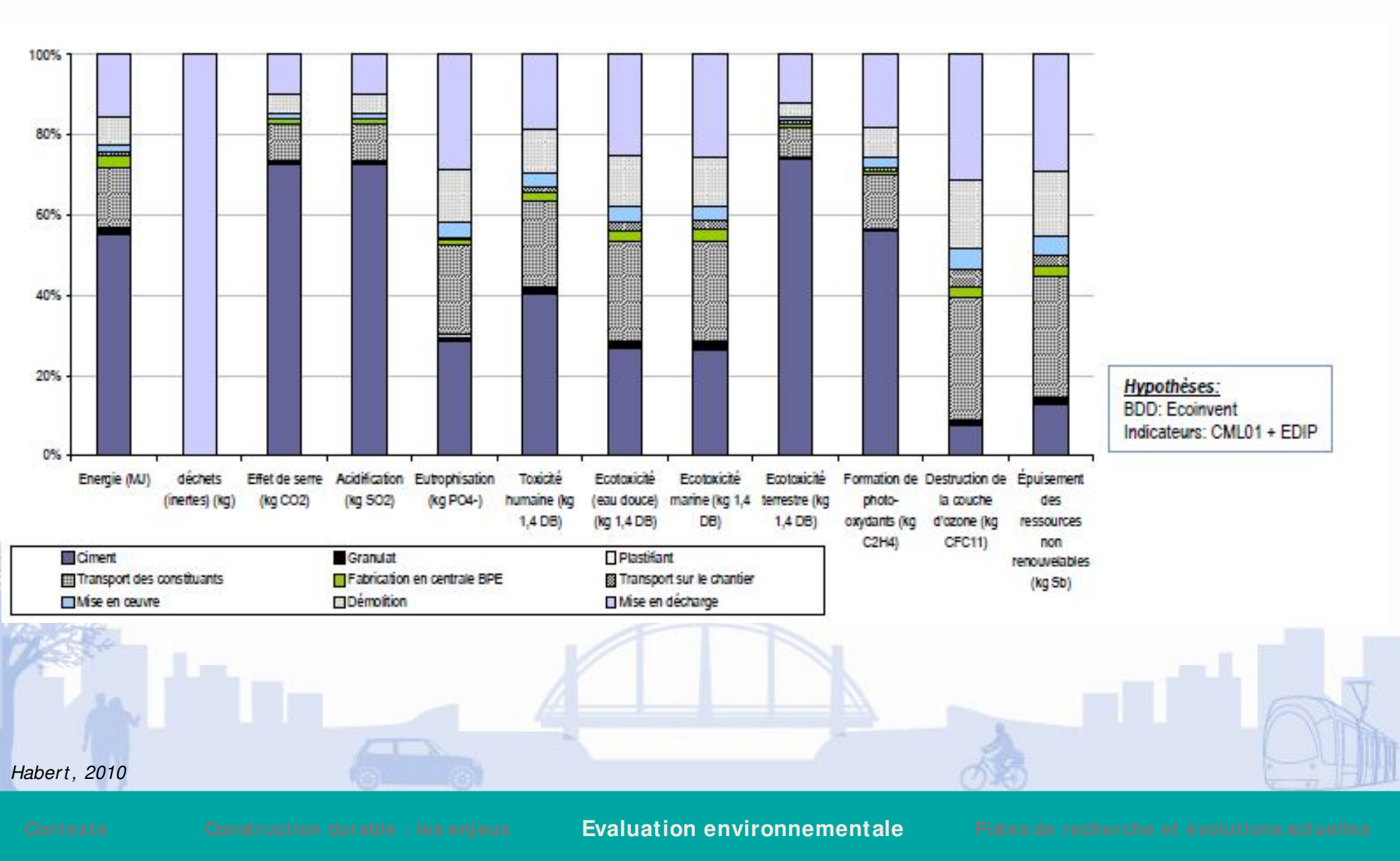


■ Exemple de composition d'un béton

- ▶ 320 kg/ m³ de ciment
- ▶ 157 kg/ m³ d'eau
- ▶ 1944 kg/ m³ de granulats



Application au cas du béton



Matériaux de construction : FDES

- FDES : *Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires*

- bilan environnemental des matériaux de construction pouvant être utilisé dans un projet
- Norme française NF P 01-010 (bientôt norme européenne EN 15804)

- présentation synthétique des caractéristiques environnementales et sanitaires d'un produit de construction pour toutes les phases de sa vie :

- ACV selon la norme NF EN 14040
- émissions de substances dans l'air, l'eau et le sol par les produits de construction
- communication des résultats de cet inventaire et de ces essais selon un format commun à tous les produits de construction

- Utilisée dans la conception de bâtiment selon la démarche HQE®

- Peuvent être contrôlées par un vérificateur agréé par l'AFNOR

- Obligatoire à partir de 2017 pour les entreprises qui communiquent sur l'aspect "environnemental" de leur produit

- Fiches consultables sur le site www.inies.fr : 1235 fiches enregistrées à ce jour couvrant 22432 produits



Matériaux de construction : FDES

The screenshot shows the INIES website interface. At the top, the URL is www.base-inies.fr/Inies/Consultation.aspx. The header features the INIES logo and the text: "Base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages". Navigation tabs include "Accueil Consultation", "Catalogue de la base", "Recherche d'un produit", "Lexique", "Documentation", "F.A.Q", and "Espace de déclaration". The breadcrumb trail is "Accueil >> Accueil Consultation >> Recherche d'un produit".

The search results section is titled "Recherche d'un produit" and shows "Critères de recherche" on the left and "Résultats de la recherche: 114 FDES répond(ent) à vos critères de recherche." on the right. The search criteria are:

- Nom du Produit:
- Nom de l'organisme déclarant:
- Mot(s) clé(s):

The search results list 14 items, each with a blue globe icon and a product name followed by its FDES number and environmental impact values:

- Plaque de plâtre Doublissimo confort 3.40 - 13+100
- Plaque de plâtre doublissimo performance 4.10 - 13+120
- Plaque de plâtre Doublissimo confort 2.55 - 13+80
- Plaque de plâtre Doublissimo confort 3.15 - 13+100
- Plaque de plâtre Doublissimo confort 3.80 - 13+120
- Plaque de plâtre Placomur essentiel 1.10 13+40
- PLaque de plâtre Placomur essentiel 1.30 - 13+40
- Plaque de plâtre Placomur essentiel 1.60 13+60
- Plaque de plâtre Placomur maison confort 2.65 13+100
- Plaque de plâtre Placomur maison confort 3.15 - 13+100
- Plaque de plâtre Placomur maison confort 3.80 - 13+120
- Plaque de plâtre Placomur maison performance 4.10 - 13+120
- Plaque de plâtre Placomur® Maison Confort 2.55 - 13+80
- Plaque de plâtre Placomur essentiel 2.15 10+80
- Plaque de plâtre Placomur maison performance 4.75 13+140

At the bottom, a teal navigation bar contains the following text: "Contexte", "Construction durable : les enjeux", "Evaluation environnementale", and "Pistes de recherche et évolutions actuelles".

Sommaire

Contexte

- Contexte environnemental
- Emissions de gaz à effet de serre

① Construction durable : les enjeux

- Matériaux et construction
- Emissions de CO₂ pour la fabrication de ciment
- Energie consommée pour la fabrication de ciment

③ Pistes de recherche et évolutions actuelles

- Substitution/ modification chimique du ciment
- Utilisation de bétons hautes performances
- Utilisation de granulats recyclés
- Charges alternatives

② Evaluation environnementale

- Analyse du cycle de vie : méthodologie
- Application au ciment
- Application au béton
- Matériaux de construction : FDES



Principales pistes de recherche et évolutions actuelles

■ Substitution ou modification de la formulation du ciment

- clinker sulfo-alumineux
- laitiers
- cendres volantes
- fumées de silice
- métakaolin
- verre

■ Réduction du volume de béton en améliorant ses performances

■ Utilisation de granulats recyclés

■ Utilisation de granulats alternatifs

- MIOMS
- polystyrène expansé
- granulats végétaux



Ciments sulfoalumineux

- Développés en Chine dans les années 1970
- Obtenus par chauffage à 1300-1350°C d'un mélange de calcaire, de bauxite et de gypse
- Contiennent une quantité importante de yeelite (4 CaO.3 Al₂O₃.SO₃ : 60 à 70%)
- Résistances mécaniques élevées : 35 MPa à 12 heures, 50 à 70 MPa à 3 jours
- Bonne résistance au gel, faible porosité, résistance à la corrosion
- Impact environnemental

	<i>Clinker Portland</i>	<i>Clinker sulfoalumineux</i>
Energie pour la clinkerisation	3, 845 GJ/ t	3,305 GJ/ t
Energie pour la broyage	165 à 180 MJ/ t	72 à 108 MJ/ t

- Emissions de CO₂ réduites en moyenne de 10%(jusqu'à 36%pour certaines compositions)

Substitution du ciment : laitiers

■ Laitiers : co-produits de l'industrie métallurgique peu valorisés

- Composé d'oxydes métalliques, essentiellement des silicates, des aluminates et de la chaux, qui sont formés en cours de fusion ou d'élaboration de métaux par voie liquide
- La nature du laitier dépend de celle du métal ou de l'alliage produit

■ 3 sources différentes :

- **Laitier de haut-fourneau** : 2,8 Mt/ an, totalement valorisé
- Laitier de convertisseur : 1,1 Mt/ an
- Laitier de silicomanganèse : 60 000 t/ an

■ Production française concentrée dans les régions du Nord (Dunkerque) de la Provence (Fos-sur-Mer) et en Lorraine (Florange)

■ Valorisation

- Laitier cristallisé : granulats pour béton ou enrobés bitumineux
- Laitier pour ciment : laitier vitrifié

Normalisé : NF EN 15167 (*Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis*)



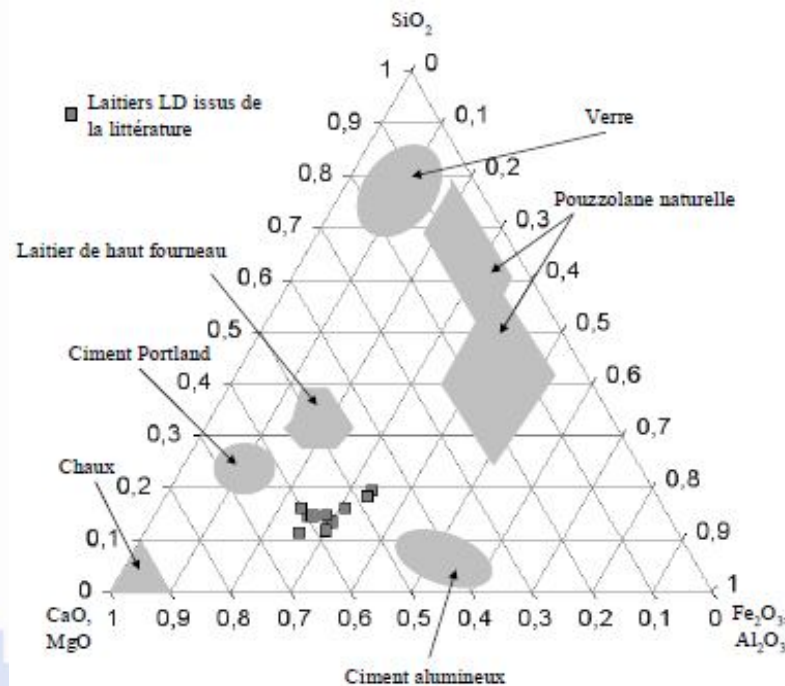
Substitution du ciment : laitiers

■ Composition

- Chaux (CaO) : 38 à 48%
- Silice (SiO_2) : 29 à 41%

- Alumine (Al_2O_3) : 9 à 18%
- Magnésie (MgO) : 1 à 9%

- Refroidissement rapide à l'air : granulation rapide, vitrification de la structure



Substitution du ciment : laitiers

■ Activité hydraulique :

- Propriétés hydrauliques latentes : il est nécessaire d'activer les laitiers pour les rendre réactifs vis-à-vis de l'eau
- Dépend de sa composition chimique, de sa structure et de sa finesse

■ Hydratation

- clinker : réaction hydrolytique (avec l'eau)
- laitier : réaction hydroxylytique (avec OH^-) ➔ nécessité d'être en milieu basique ($\text{pH} > 12$)

➔ Activation chimique (portlandite, sulfate de calcium), mécanique (broyage poussé) ou thermique



■ Les ions Ca^{2+} et OH^- provenant de l'hydratation du clinker activent la dissolution du laitier et permettent d'obtenir des silicates de calcium hydratés (CSH)

➔ **Réaction hydraulique latente**

➔ Diminution de la quantité de portlandite

Propriétés des ciments au laitier

- CEM III/ A : 36 à 65%de laitier, 35 à 64%de clinker
- CEM III/ B : 66 à 80%de laitier, 20 à 34%de clinker
- CEM III/ C : 81 à 95%de laitier, 5 à 19%de clinker

- Bonne résistance aux agents agressifs : eaux sulfatées, eau de mer, eau résiduaire (stations d'épuration)
- Faible chaleur d'hydratation ➔ Fabrication possible de pièces massives
- Très faible perméabilité
- Résistance au gel
- Durcissement lent mais aboutissant à des résistances mécaniques plus élevées que les CEM I de même classe de résistance
- Sensibles à la carbonatation



Intérêt environnemental des ciments au laitier

- Bétons à faible teneur en carbone

- **Exemple** : 5000 m³ de béton pour la construction d'un bâtiment collectif de 4 étages avec parking

 - pour un béton contenant uniquement du CEM I : 1350 t de CO₂ émises

 - substitution de 50% du CEM I par du laitier moulu : 690 t de CO₂

- ➔ Diminution de 50% de émissions de CO₂

 - Autres gains : émissions de 1400 kg de NO_x et 725 kg de SO₂, extraction de 1146 t de calcaire et d'argile

- Autre avantage : teinte plus claire ➔ augmentation de la réflectivité du bâtiment

 - Réduction de l'absorption solaire du bâtiment et des besoins en climatisation



Substitution du ciment : laitiers

- Exemple d'ouvrage : préfabrication des voussoirs du tunnel de Saverne (ligne TGV est)

32 000 t de ciment



Substitution du ciment : additions pouzzolaniques

- Principalement fumées de silice et cendres volantes

■ **Fumées de silice** : sous-produit de la fabrication du silicium dans un four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon (EN 13263-1 : Fumée de silice pour béton)

- Particules sphériques de diamètre compris entre 0,03 et 0,3 μm
- Composées de 94 % au moins de silice amorphe très réactive
- Finesse des particules → forte réactivité, quantité de chaleur dégagée élevée, diminution de la porosité
- Combinées à des superplastifiants, elles permettent d'obtenir des bétons de très haute compacité



Substitution du ciment : additions pouzzolaniques

■ **Cendres volantes** : proviennent de l'industrie métallurgique ou sont contenues dans les gaz en sortie des chaudières de centrales thermiques produisant de l'électricité suite à la combustion du charbon (EN 450-1 : Cendres volantes pour béton)

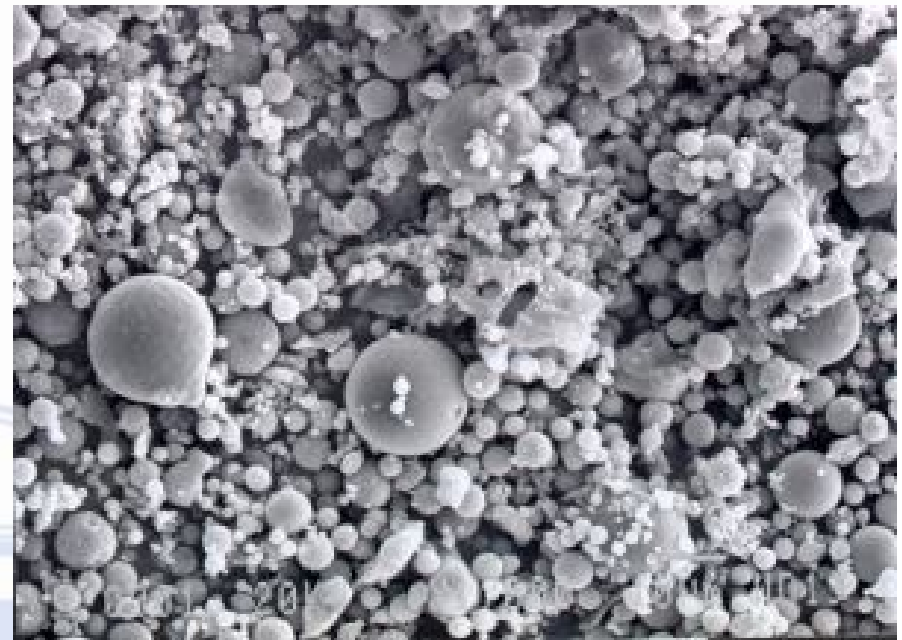
■ billes parfaitement sphériques de diamètre compris entre 10 et 100 μm

■ compositions chimiques variables en fonction de la nature du combustible, de l'origine d'extraction du carburant et du mode de combustion

➔ réactivité variable selon la composition chimique, réaction significative quand le pH est supérieur à 13

▶ affaiblissement des résistances mécaniques au jeune âge et un retard de prise

▶ réduction de la température maximale atteinte au jeune âge, une résistance accrue à long terme et un affinement de la structure poreuse, grande durabilité

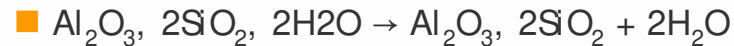


Substitution du ciment : métakaolin, verre

■ Métakaolin

■ NF P18-513 – Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons – Définitions, spécifications et critères de conformité

■ Métakaolin : issu de la calcination de la kaolinite entre 600 et 800°C



■ 1 t de MK = 175 kg de CO_2

■ Composé principalement d'alumine et de silice amorphes ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=1.2$)

■ Caractère pouzzolanique

■ Ce n'est pas un sous-produit industriel : il n'est pas tributaire des aléas technico-économiques de la fabrication de l'acier (laitiers) et du silicium (fumée de silice), ou de la production de l'électricité (cendres volantes)



■ Verre

■ Poudre de verre recyclée et micronisée

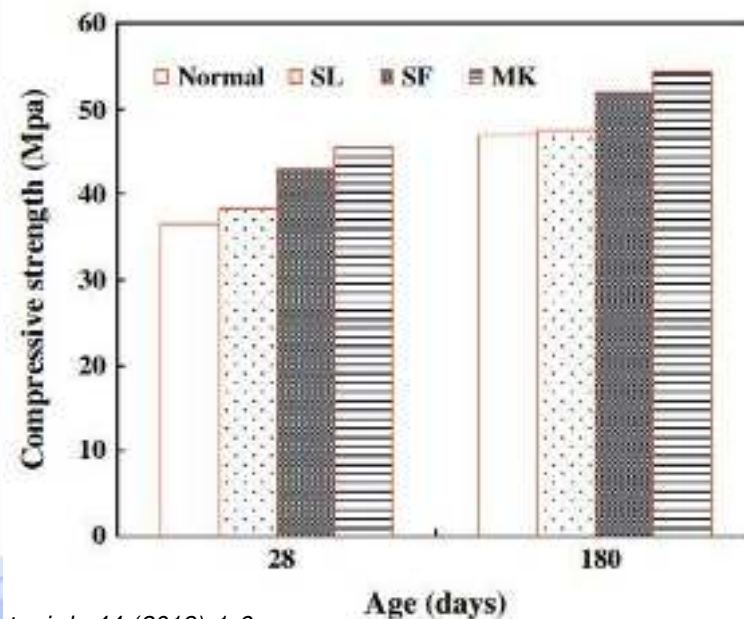
■ particules riches en silice amorphe ➔ propriétés pouzzolaniques

■ Substitution de 20 à 30% du ciment



Substitution du ciment : additions pouzzolaniques

- Réaction avec la portlandite → faible quantité de portlandite dans le ciment
 - phase très sensible aux agressions chimiques du fait de sa grande solubilité
 - avantage : durabilité vis-à-vis de l'alcali-réaction
 - réserve basique pour maintenir la passivation des armatures
 - Limite : risque de corrosion des armatures

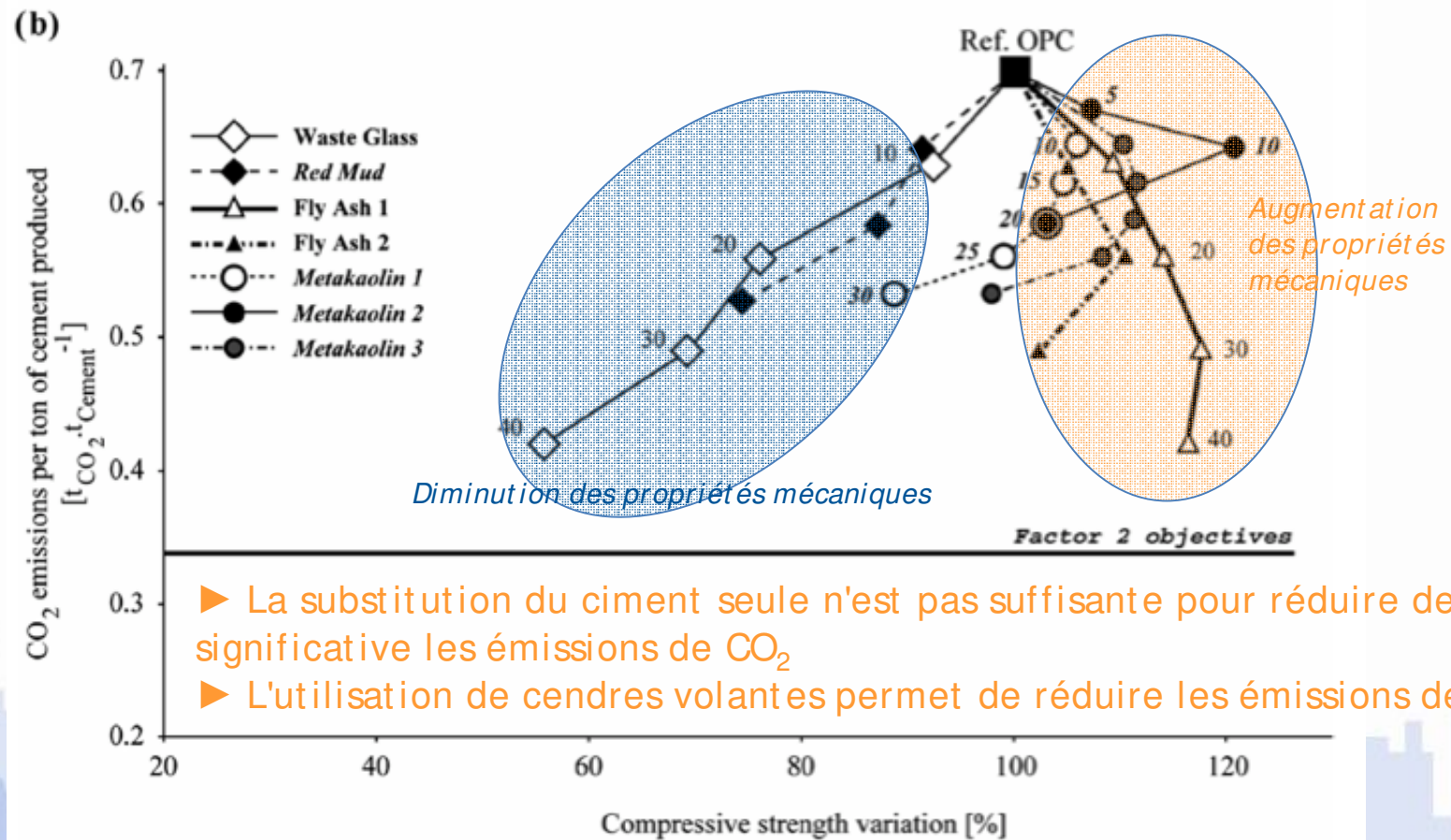


SL (slag) : laitier
SF (silica fume) : fumées de silice
MK : métakaolin

P. Duan et al., *Construction and Building Materials* 44 (2013) 1-6

Substitution du ciment et/ ou utilisation d'un béton hautes performances

- Substitution du ciment : souvent un compromis entre résistance mécanique et émissions de CO₂



- ▶ La substitution du ciment seule n'est pas suffisante pour réduire de façon significative les émissions de CO₂
- ▶ L'utilisation de cendres volantes permet de réduire les émissions de 25%

G. Habert, N. Roussel, Cement & Concrete Composites 31 (2009) 397-402

Substitution du ciment et/ ou utilisation d'un béton hautes performances

- Autre solution : diminuer la quantité de béton utilisée en augmentant ses performances
 - béton classique pour le bâtiment : 25/ 30 MPa de résistance en compression
 - en remplaçant ce béton par un autre ayant une résistance double : gain de 30% des émissions
 - en utilisant en béton ultra-hautes-performances (120 MPa) : gain de 50%



G. Habert, N. Roussel, Cement & Concrete Composites 31 (2009) 397-402

Réduction du volume de béton en améliorant ses performances

- Bétons à très hautes performances
 - BPR : bétons de poudre réactive (1995)
 - BEFUP : béton fibré à ultra hautes performances
 - Teneur en eau très faible ($E/C < 0,25$), utilisation de superplastifiants
 - Très faible porosité (2 à 5%)
 - Résistance en compression à 28 jours entre 130 et 250 MPa



BFUP

- Grande durabilité
- Structure légère, structure creuse
- préfabrication

Stade Jean Bouin



Stade Jean Bouin



Quai de gare, Calgary

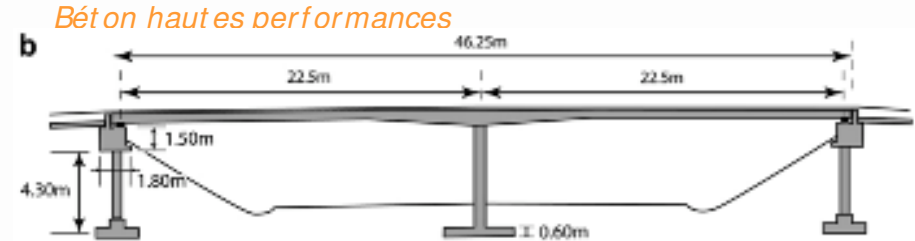
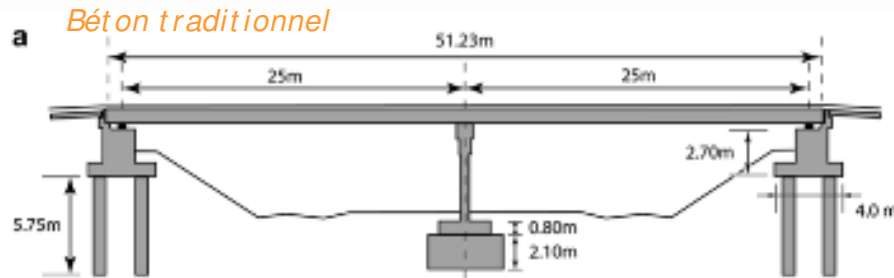


Footbridge of Peace, Seoul, Corée du Sud

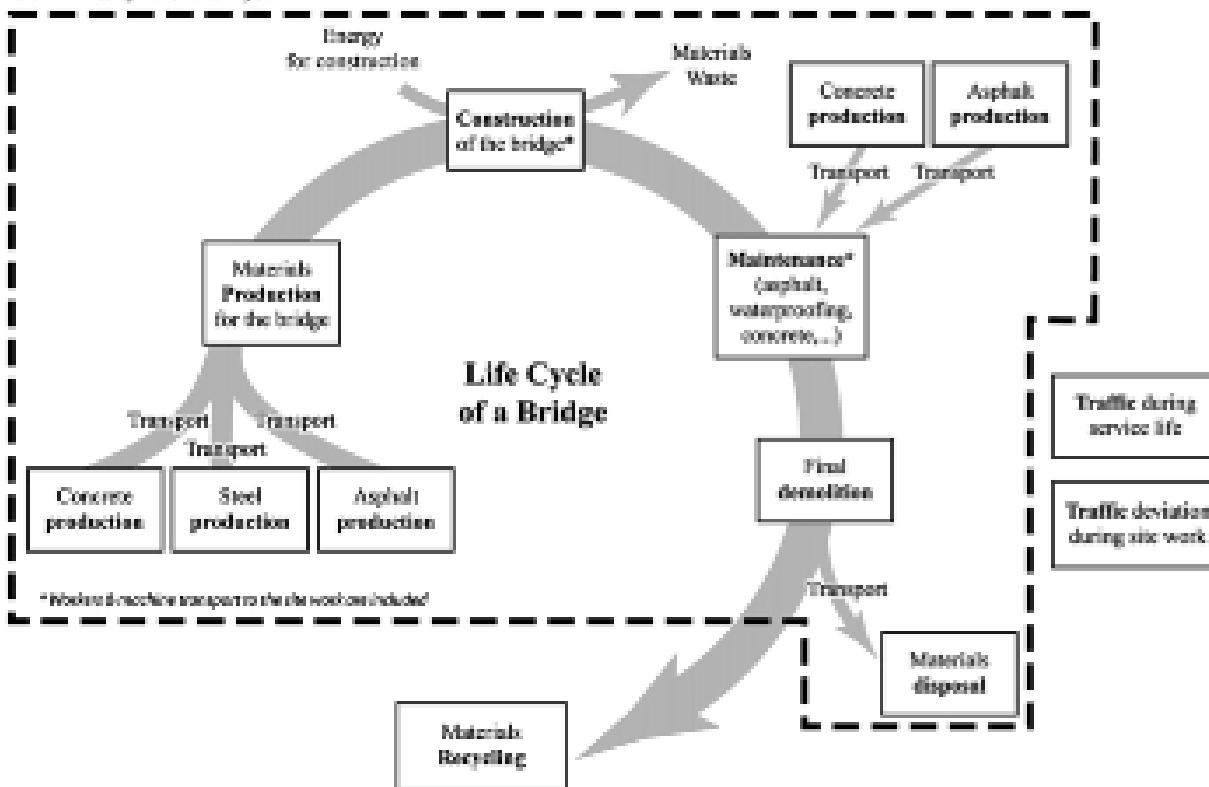


Comparaison de deux ouvrages

- 2 ponts 4 voies, en béton traditionnel et en béton hautes performances



Boundaries of the studied system



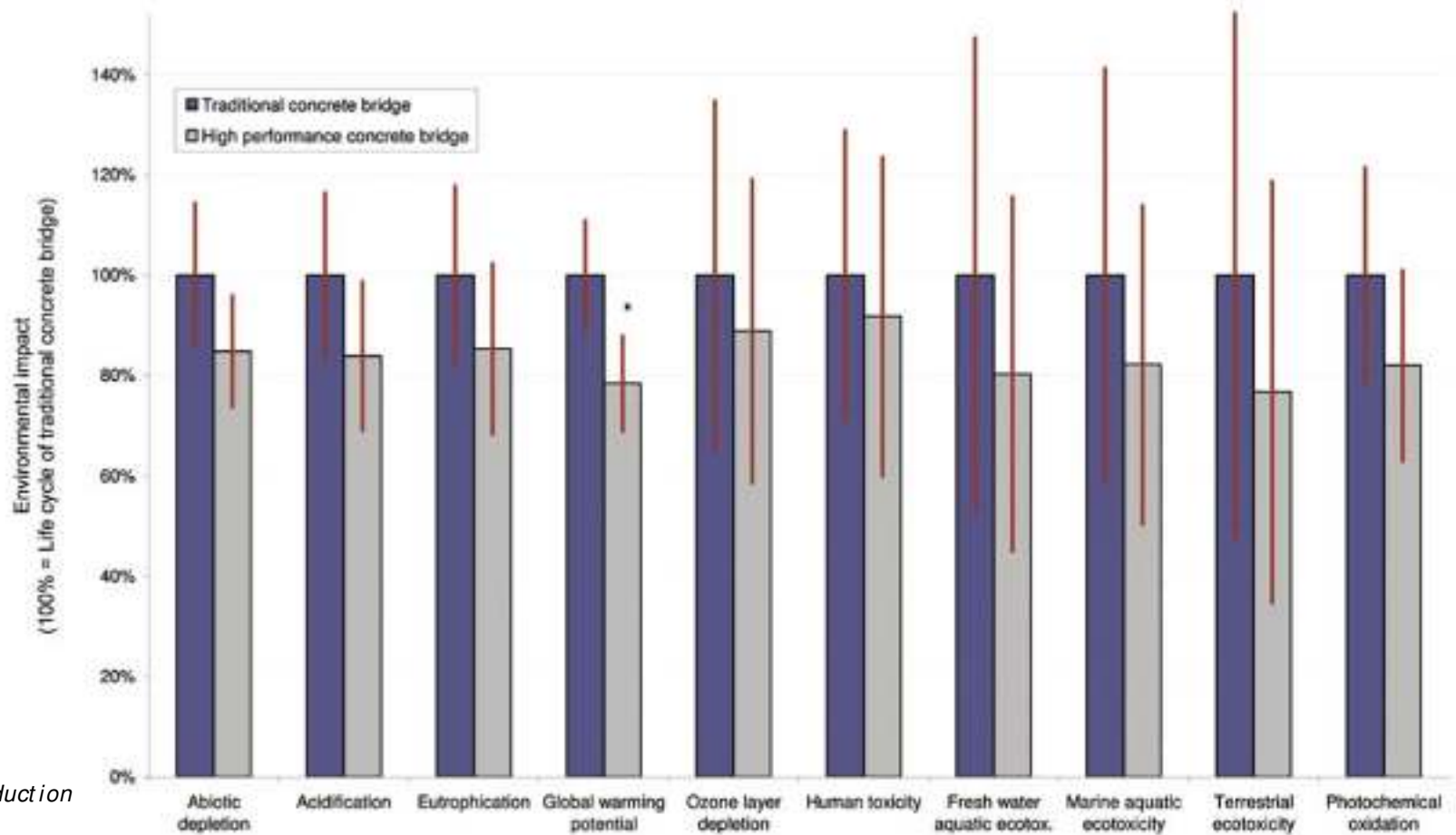
du système étudié

G. Habert et al.,
Journal of Cleaner Production
35 (2012) 250-262

es de recherche et évolutions actuelles

Comparaison de deux ouvrages

- Forte dispersion des résultats pour chaque catégorie d'impact (20%)
 - Incertitudes principales : phases de maintenance
- Amélioration de 20% pour le béton hautes performances



G. Habert et al.,
Journal of Cleaner Production
35 (2012) 250-262

Utilisation de granulats recyclés

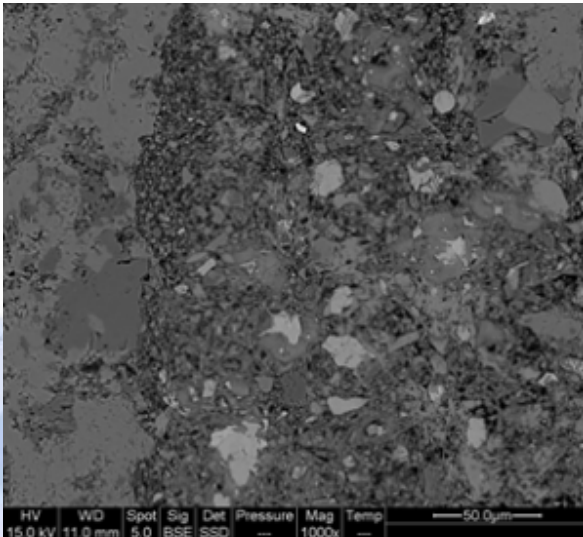
- 900 millions de tonnes de déchets de construction par an, composés essentiellement de béton
- Taux de recyclage variable selon les pays : 95% en Suisse, 80% en Allemagne, 63% en France, 0% au Portugal



- Après triage et concassage, les granulats recyclés peuvent
 - être utilisés en sous-couche routière en remplacement de granulats naturels,
 - être incorporés avec du sable et du ciment pour former un nouveau béton
- Aujourd'hui, 10% des 200 millions de tonnes de granulats utilisés pour des travaux de voirie et de remblais sont recyclés.

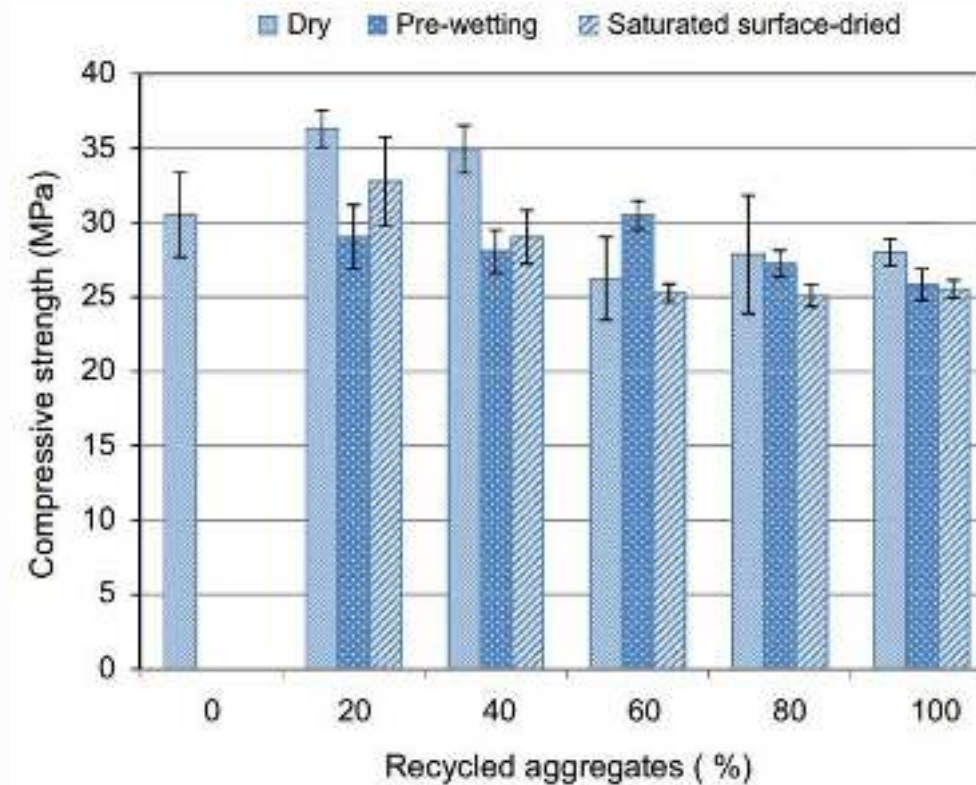
Utilisation de granulats recyclés

- Les granulats recyclés sont soumis aux mêmes normes que les granulats naturels (NF EN 12620 "Granulats pour bétons hydrauliques")
- Ils sont constitués :
 - de granulats naturels concassés partiellement
 - de pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels.
- Le taux de pâte de ciment présent dans les granulats recyclés de béton varie en fonction de leur origine (formulation du béton parent)
- Leur densité est plus faible et leur capacité d'absorption d'eau plus élevée que celles des granulats naturels



Utilisation de granulats recyclés

- Influence de la quantité d'eau dans les granulats recyclés sur les propriétés du béton
 - pré-mouillage des granulats : permet d'éviter des problèmes d'ouvrabilité du béton frais
 - on peut utiliser 20-40% de granulats recyclés sans altérer les propriétés mécaniques



H. Mefteh et al., *Journal of Cleaner Production* 54 (2013) 282-288

Utilisation de granulats alternatifs

- Polystyrène expansé
 - granulat léger
 - propriétés d'isolation thermique et acoustique
 - utilisé en chape pour rénover combles et planchers



- MIOMS : Mâchefer d'Incinération des Ordures Ménagères
 - résidus solides de la combustion des déchets, restant en sortie basse de four



Utilisation de granulats alternatifs

- développement de bétons contenant des granulats végétaux pour des propriétés d'isolation thermique et acoustique
 - granulat léger et issu de ressources renouvelables
 - matériaux poreux : propriétés d'isolation thermique et acoustique
 - faible résistance mécanique : nécessité d'une structure porteuse



Rénovation de la maison de la Turquie, Nogent/ seine (Ch. Rasetti, 1986)



■ *Etudiés en détail dans le prochain cours...*

Conclusions

- Utiliser le bon matériau, au bon endroit, au bon moment...
- Les matériaux sont responsables de 15 à 18% de l'impact environnemental global d'un bâtiment
 - Tendance en hausse avec les réglementations thermiques
- Trois critères de choix des matériaux
 - performances techniques
 - influence sur l'environnement
 - conséquences sur la santé

