

Evaluation environnementale des matériaux et des procédés de construction : application de l'analyse du cycle de vie à la construction d'un hall industriel

(Environmental evaluation of materials and building processes: application of the life cycle analysis to the construction of an industrial hall)

L. Courard¹, Ch. Rademaker¹ et Ph. Teller²

(1) Département des Matériaux de Construction, Université de Liège

(2) Laboratoire de Chimie industrielle, Université de Liège

Article reçu : le 20 novembre 2000; Article accepté : le 14 mars 2001

R É S U M É

Les méthodes basées sur l'Analyse du Cycle de Vie (A.C.V.) permettent de réaliser une évaluation globale et complète des impacts environnementaux des produits, depuis la phase de production jusqu'à l'utilisation et l'élimination (« du berceau à la tombe »), selon des concepts reconnus et standardisés au niveau international. Ces méthodes ont jusqu'à présent été très peu appliquées au secteur de la construction et des matériaux, domaine qui présente pourtant un intérêt majeur puisque les flux de matières et d'énergie y sont importants et que les constructions et ouvrages ont une durée de vie relativement longue.

Une méthode d'analyse, basée sur le calcul des écoprofiles, a été appliquée dans le cadre de l'étude de la construction d'un hall industriel, soit en béton, soit en acier, soit en bétons/bois lamellé-collé; les matériaux mais aussi les phases et procédés de construction sont comparés du point de vue de leur impact environnemental.

Cette analyse constitue, à côté des facteurs techniques et économiques, une nouvelle approche permettant notamment au concepteur et au donneur d'ordres d'avoir une vision globale de l'interaction des constructions avec leur environnement.

A B S T R A C T

Methodologies based on Life Cycle Assessment (L.C.A.) give the opportunity to realise a global and complete evaluation of the environmental effects of products from their production to their use and elimination (from cradle to grave); methods used for analysis are internationally wellknown and standardised. These methods are rarely used in construction materials area, although materials flows and energy consumption are important and constructions have a long way of life.

A calculation methodology, based on ecofactors/ecopoints, has been used for the analysis of industrial hall made of concrete, steel, or concrete/wood structure; materials but also construction process are compared at the point of view of their environmental impact.

This analysis completes the technical and economical approaches for the construction owner and designer and gives a global view of the interaction between construction and civil engineering, and environment.

1. INTRODUCTION

Le monde de la construction est en interaction constante avec l'environnement, induisant des impacts à la fois positifs (aménagement du territoire, recyclage de déchets et sous-produits industriels...) et négatifs (pollutions sonores, productions de déchets, modifications de l'écosystème...). Le choix du mode de construction doit être basé sur une démarche qui globalise la vie du matériau ou de la construction, en intégrant les quantités d'énergie – et par conséquent la production des polluants – qui auront servi à l'extraction des matières premières et/ou au

transport, tout autant que les produits ou les engins de chantier qui auront servi à l'édification et/ou la démolition de la structure. C'est seulement quand le bilan global sur toute la vie des matériaux et des constructions aura été envisagé que le maître d'œuvre, le bureau d'études ou l'entrepreneur sera capable d'évaluer l'impact réel de la construction sur l'environnement, de repérer les étapes de la vie des matériaux et des structures qui interagissent le plus avec l'environnement (édification, entretien, fonctionnement, démolition...) et de choisir le mode de construction ainsi que les matériaux qui semblent les plus favorables au cas de figure étudié.

Note éditoriale

Luc Courard est Membre de la RILEM. Il participe à la Commission Technique RILEM 151-APC 'Adhesion Technology in Concrete Engineering - Physical and Chemical Aspects'.

2. LES ANALYSES DE CYCLE DE VIE : PRINCIPES ET MÉTHODES

Les **Analyses de Cycle de Vie**¹ sont apparues au début des années 70. À l'époque, ces études portaient essentiellement sur la consommation énergétique totale du cycle de vie des produits d'emballage (bouteilles en verre, bouteilles en plastique, cartons,...). Depuis lors, de nombreuses innovations ont vu le jour : de plus en plus d'impacts environnementaux sont pris en compte (effet de serre, substances cancérigènes, utilisation des terres,...) et ces impacts sont de mieux en mieux estimés.

De plus, une standardisation de plus en plus présente (cf. « famille » de normes ISO 1404X) cristallise la manière dont les ACV doivent être conduites et ce, dans le but d'accroître la transparence sur la méthode utilisée et la transférabilité des résultats obtenus.

Les principales étapes de l'Analyse de Cycle de Vie sont les suivantes (Fig. 1) : l'extraction des matières premières, l'élaboration du produit, sa distribution, son utilisation, son entretien ou sa réparation éventuelle, sa fin de vie (démontage ou démolition), et enfin le traitement des déchets (recyclage, valorisation, élimination).

On évalue les charges environnementales grâce à des indicateurs tels que les matières premières utilisées, les

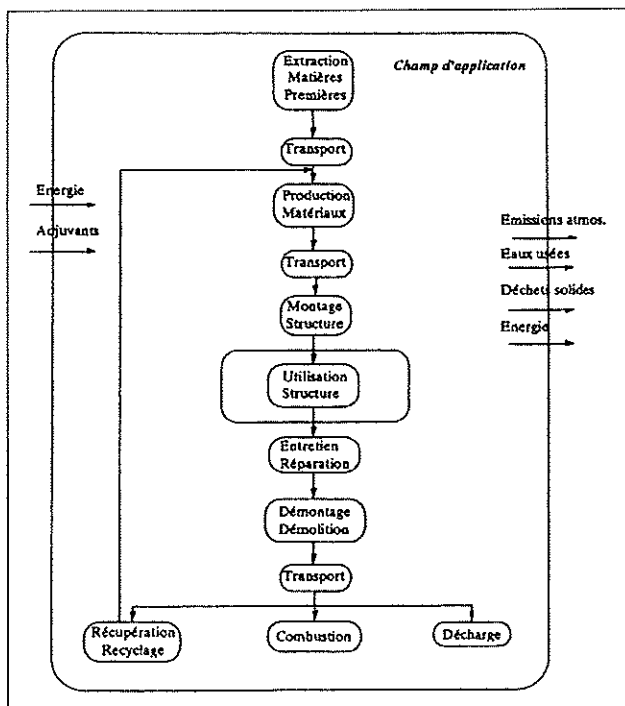


Fig. 1 – Processus séquentiel de l'Analyse de Cycle de Vie.

besoins en énergie, en eau, les déchets solides, les rejets de poussières, de gaz, la pollution de l'eau,... Une fois ces indicateurs estimés, ils sont éventuellement pondérés et additionnés, ce qui donne un bilan écologique. La **pondération**, qui est le processus de conversion des résultats

de l'indicateur en utilisant des facteurs numériques basés sur des choix de valeur, est particulièrement importante. Ce domaine est en plein développement : EQUER, ESCALE, PAPOOSE ou encore TEAM sont des logiciels développés en France [8] et qui permettent d'évaluer l'impact de la construction à différents stades de sa vie mais la plupart du temps sans intégration globale.

Plutôt que de considérer uniquement le matériau, le travail réalisé ici [9] vise à intégrer aussi l'effet du choix des **procédés et techniques de construction** dans le bilan environnemental global.

3. LA MÉTHODE DES ÉCOFACTEURS/ÉCOPOINTS

3.1 Principes de la méthode

Cette méthode a été développée en Suisse, en 1991 par l'Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEPF) [14, 15]. Les auteurs (Ahbe, Braunschweig et Müller-Wenk) proposent de calculer chaque valeur d'émission puis de les comparer individuellement à la charge polluante théoriquement admissible pour la même substance qui serait émise dans un espace bien déterminé. Cette technique permet :

- d'établir la contrainte exercée dans cet espace pour chaque substance émise dans l'air ou dans l'eau ;
- de prendre en compte les limites écologiques propres aux différents espaces écologiques considérés de l'environnement, autrement dit leur capacité d'absorber des polluants ou leur seuil de saturation ;
- et de ramener le résultat du calcul à un seul et unique indice.

Chaque flux de l'écobilan reçoit une note, l'**écopoint**, obtenu en multipliant le rejet effectif mesuré dans le bilan pour le flux considéré par le facteur de pondération correspondant, l'**écofacteur**.

3.2 Calcul des écofacteurs et des écopoints

Pour une substance *i* et pour un territoire donné, l'**écofacteur** est donné par la relation :

$$\text{Écofacteur}_i = (1/F_{ki}) \cdot (F_i/F_{ki}) \cdot c$$

où F_{ki} représente la charge maximale légalement admissible de la substance sur le territoire, exprimée en unité de masse (la tonne, par exemple) ;

F_i représente la contrainte exercée par cette substance sur le territoire considéré, exprimée en unité de masse ;

c est un coefficient sans dimension servant à éviter la présence de trop grandes puissances négatives ($c = 10^{12}$).

Le rapport F_i/F_{ki} permet d'appréhender la notion de saturation écologique qui exprime le rapport entre l'ampleur des contraintes effectivement exercées sur la nature et la capacité limitée de celle-ci à subir les atteintes. C'est le rapport entre la contrainte actuelle et la contrainte admissible. Le terme $1/F_{ki}$ joue le rôle de pondérateur de l'écofacteur en fonction de la nocivité ou

(1) On traduit en anglais Analyse de Cycle de Vie par Life Cycle Assessment, ce qui conduit à l'emploi des deux abréviations ACV et LCA.

Tableau 1 - Caractéristiques des éléments de structure			
Type de structure	Acier	Béton	Béton / Bois
• Superstructure			
colonnes	32 IPE 600 (L = 8,15 m)	32 BA 500/400 (L = 8,6 m)	32 BA 500/400 (L = 8,6 m)
colonnes pour pignons	8 IPE 300 (L = 8,15 m)	8 BA 400/400 (L = 8,6 m)	32 BA 500/400 (L = 8,6 m)
poutres	32 IPE 550 (L = 15,17 m)	16 BA IV 1500/400 (L = 30 m)	16 Bois lamellé-collé en sapin blanc du nord 112,5/157,5/112,5 cm de 18,5 cm d'épaisseur (L = 30 m)
• Infrastructure			
semelles portiques	BA (1,2 x 1,2 x 3 m)	BA (1,5 x 0,3 x 3 m)	BA (1,5 x 0,3 x 3 m)
semelles colonnes	BA (1,2 x 1,2 x 3 m), fûts en BA (0,6 x 0,6 x 0,5 m)	BA (1,6 x 0,3 x 3 m)	BA (1,6 x 0,3 x 3 m)
semelles de coins	-	BA (2,2 x 0,3 x 2 m)	BA (2,2 x 0,3 x 2 m)
• Bardage toiture			
pannes	Z (200 mm) / esp. = 1,5 m	caisson métallique	caisson métallique
isolation	4 cm	{ MP 106.250/3 avec	{ MP 106.250/3 avec
couverture	tôle M30.204/5	isolation et roofing	isolation et roofing
• Bardage latéral			
pannes	Z (200 mm) / esp. = 2 m	Z (200 mm) / esp. = 2 m	Z (200 mm) / esp. = 2 m
bardage	tôle MP 30.204/5	tôle MP 30.204/5	tôle MP 30.204/5

IPE = poutres en acier de type IPE BA = béton armé Z = forme des panneaux de bardage en Z.

de l'écotoxicité d'un produit.

Une particularité de la méthode réside dans le fait que sa validité est circonscrite à un territoire. Dans notre cas, on s'est attaché au seul territoire belge. Les seuils de saturation écologique sont donc calculés sur base des normes et rejets propres au territoire national, même dans le cas d'un objet fabriqué à l'étranger. En procédant autrement, on court le risque de privilégier des matériaux produits à l'étranger, ce qui reviendrait à exporter la pollution.

Les **écopoints** sont obtenus par la multiplication de l'écofacteur par la charge écologique respective de la substance considérée:

$$\text{Écopoint}_i = \text{Écofacteur}_i \cdot C_i$$

où C_i est le flux de la substance i pour le système ou le produit étudié, exprimé en unité de masse (le gramme, par exemple).

On peut calculer un indice I unique en rassemblant les écopoints; on obtient alors l'écopoint du produit considéré.

$$I = \sum \text{Écopoint}_i \quad i = 1, \dots, n$$

où n représente le nombre de substances considérées.

Cette méthode tient compte d'une pondération implicite des effets, dépendant des valeurs limites issues des réglementations légales.

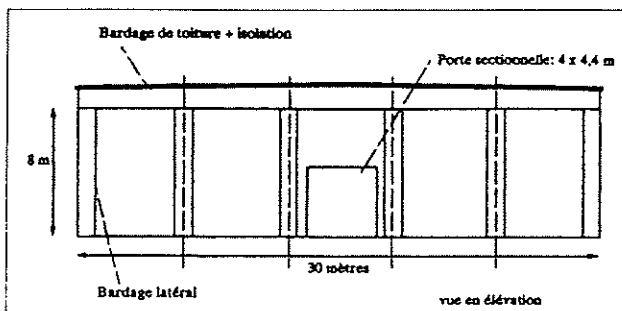


Fig. 2 - Croquis du hall industriel.

Cette méthode n'est évidemment pas la seule ni la plus récente et d'autres méthodologies ont été développées depuis lors [8]; elle nous a toutefois permis de réaliser cette première approche dans le domaine de la construction. Nous l'avons appliquée au cas de la construction d'un hall industriel.

4. CONSTRUCTION D'UN HALL INDUSTRIEL

4.1 Caractéristiques du hall industriel

La structure étudiée est du type hall industriel [9] destiné au stockage de matériaux de construction (Fig. 2). Les conditions d'utilisation du hall sont normales, sans contraintes particulières ou exceptionnelles. Les dimensions sont les suivantes: longueur = 80 m; largeur = 30 m; hauteur libre = 8 m.

Nous avons considéré trois structures différentes pour le même hall:

- une structure d'ossature complètement en acier;
- une structure d'ossature complètement en béton armé;
- une structure constituée de colonnes en béton armé surmontées par des poutres en bois lamellé-collé.

Le bâtiment est finalement constitué de 14 portiques et de 2 pignons; l'entre distance entre portiques est de 6 m. Le hall possède de plus une porte de section $l \times h = 4,00 \times 4,40$ m. Les éléments utilisés sont des profilés standards, ainsi que des poutres et colonnes préfabriquées. Un bardage pour la toiture et les pignons, ainsi qu'une isolation, sont prévus pour les trois types de structures. Enfin, le système de contreventement est identique.

4.2 Dimensionnement de la structure

Les principaux résultats du dimensionnement des trois types de structures sont résumés dans le Tableau 1 [9].

Tableau 2 – Quantités de matériaux			
a. HALL MÉTALLIQUE			
	Quantité	Total	Unités
ACIER			
Ossature	-	100410	kg
profilés	85709	-	-
contreventements	4750	-	-
boulons, soudure (+ 3 %)	3012	-	-
tolérance poids (+ 3 %)	3012	-	-
assemblages (+ 5 %)	5020	-	kg
Fondation	-	3600	kg
armaturage des semelles	1440	-	kg
armaturage des fûts	2160	-	kg
Couverture	-	93780	kg
toiture	35503	-	kg
parois latérales	25454	-	kg
lisses et pannes	32823	-	kg
BÉTON			
Fondation			
semelles	14	-	m ³
fûts	7	-	m ³
béton propreté	3	-	m ³
b. HALL EN BÉTON			
	Quantité	Total	Unités
ACIER			
Ossature	-	33845	kg
armaturage colonnes	6605	-	kg
armaturage poutres	21968	-	kg
contreventements	5273	-	kg
Fondation	-	4900	kg
armaturage des semelles	-	-	-
Couverture	-	93260	kg
toiture	35165	-	kg
parois latérales	25454	-	kg
lisses et pannes	32641	-	kg
BÉTON			
Ossature	-	285	m³
colonnes et mortier	66	-	m ³
poutres et mortier	219	-	m ³
Fondation			
semelles	55	-	m ³
béton propreté	9	-	m ³
c. HALL EN BÉTON ET BOIS LAMELLÉ-COLLÉ			
	Quantité	Total	Unités
ACIER			
Fondation	-	5900	kg
armaturage des semelles	-	-	kg
Ossature	-	11877	kg
armaturage colonnes	6605	-	kg
contreventements	5273	-	kg
Couverture	-	93200	kg
toiture	35126	-	kg
parois latérales	25454	-	kg
lisses et plats métalliques	32620	-	kg
BÉTON			
Ossature	-	66	m³
colonnes et mortier	-	-	-
Fondation			
semelles	55	-	m ³
béton propreté	9	-	m ³
BOIS LAMELLÉ-COLLÉ			
Poutres d'ossature	-	120	m³

4.3 Construction de la structure

Il est important de connaître exactement les quantités de matériaux nécessaires (volumes, masses), ainsi que les durées d'utilisation des engins de chantier afin de réaliser une étude complète de l'impact environnemental des trois types de structures. Les quantités ont été regroupées quand cela était possible ; dans le cas contraire, la distinction est nécessaire et un poste spécifique est créé.

4.3.1 Quantités de matériaux

Les matériaux considérés sont ici les matériaux "principaux" (en volume) (Tableau 2 (a, b, c)).

Plusieurs remarques sont à formuler dans le cadre de l'étude réalisée :

- Les aciers utilisés dans la construction diffèrent. En effet, les aciers de bardage étant des produits de qualité élevée, le pourcentage, à l'heure actuelle, de produits métalliques de recyclage utilisés dans leur élaboration reste faible (dans notre cas, nous prendrons un pourcentage de recyclés égal à 20%). Les produits de type long, tels que les poutrelles, les armatures pour bétons, peuvent être réalisés avec une proportion de recyclés bien plus élevée car la pureté exigée pour ces éléments est nettement moindre (on considérera dans ce cas un pourcentage de recyclés égal à 80%).

- Les bétons utilisés dans une construction changent suivant leur fonction. Les bétons des semelles de fondation sont amenés par camion et coulés sur place. La composition du béton diffère des bétons utilisés dans le cadre de la préfabrication de poutres et de colonnes. Dans cette étude, il y a quatre sortes de béton : béton de propreté, de fondation, de poutre, de colonne. Les compositions des différentes sortes de béton sont données dans le Tableau 3.

- La dalle de sol n'a pas été considérée dans ce travail. Il est à spécifier que les dalles constitueraient des quantités égales, la surface au sol étant la même, qui ajoutées au bilan influenceraient le résultat final mais non les conclusions.

- Le matériau isolant n'est pas étudié dans ce travail : l'analyse du cycle de vie est réalisée sur des matériaux tels que les ACIER-BÉTON-BOIS et non sur un isolant, la laine de verre en l'occurrence. On peut spécifier à titre informatif que les isolants sont souvent difficilement voire pas du tout recyclables.

- Le roofing et la peinture intumescente, appliqués à l'ossature en acier en vue de lui conférer une résistance au feu minimale, ne sont pas pris en compte dans ce travail.

Tableau 3 – Proportion des constituants (kg)

Matériaux	Béton de fondation	Béton de propreté	Béton de poutre	Béton de colonne
Ciment	300	125	350	320
Cendres volantes	-	50	-	-
Pierrailles	1080	1850	1200	1200
Sable	750	-	600	600
Eau	185	185	200	200
Adjuvant	4	-	-	-

Tableau 4 - Quantité d'heures d'utilisation des engins

1) en phase de construction						2) en phase de démolition				
a. HALL MÉTALLIQUE						Hall métallique				
	Temps unitaire	Quantité	Total (heures)	Engins type heures		Temps unitaire	Quantité	Engins type heures		
Fondations										
béton propre (m ²)	0,15	180	27	0	-	5'	40	1	4	
pose coffrage (m ²)	1,2	58	69	0	-	20'	16	2	8	
ferrailage (tonnes)	35	4	126	0	-	-	-	1	4	
pose béton (m ³)	inclus dans transport et déversement					-	-	1	12	
vibrage béton (plot)	0,08	40	3,3	4	3					
déblais (m ³)	0,1	194	19	3	27					
remblais (m ³)	0,16	171	27	3	27					
Ossature (unités)	-	-	1560	1	160					
placement poutres	-	32	-	1	-					
placement colonnes	-	40	-	1	-					
assemblage,...	-	-	-	0	-					
contreventements	-	-	-	1	-					
Bardages	dépôt du bardage avec grue puis on étend									
toiture (m ²)	0,75	2731	2048	1	8					
parois latérales (m ²)	0,6	1958	1175	1	4					
b. HALL BÉTON						Hall en béton				
	Temps unitaire	Quantité	Total (heures)	Engins type heures		Temps unitaire	Quantité	Engins type heures		
Fondations										
béton propre (m ²)	0,15	180	27	0	-	5'	40	1	4	
pose coffrage (m ²)	1,2	108	130	0	-					
ferrailage (tonnes)	35	5	172	0	-					
pose béton (m ³)	inclus dans transport et déversement									
vibrage béton (plot)	0,08	40	3,3	4	3					
déblais (m ³)	0,1	361	36	3	36					
remblais (m ³)	0,16	236	38	3	38					
Ossature (unités)	-	-	208	1	64					
placement poutres	3	16	-	1	16					
placement colonnes	4	40	-	1	40					
jonctions (m ³)	-	0	-	0	-					
contreventements	-	-	-	1	8					
Bardages	dépôt du bardage avec grue puis on étend									
toiture (m ²)	0,75	2705	2029	1	8					
parois latérales (m ²)	0,6	1958	1175	1	4					
c. HALL BÉTON ET BOIS LAMELLÉ-COLLÉ						Hall béton/bois lamellé-collé				
	Temps unitaire	Quantité	Total (heures)	Engins type heures		Temps unitaire	Quantité	Engins type heures		
Fondations										
béton propre (m ²)	0,15	180	27	0	-	5'	40	1	4	
pose coffrage (m ²)	1,2	108	130	0	-					
ferrailage (tonnes)	35	6	207	0	-					
pose béton (m ³)	inclus dans transport et déversement									
vibrage béton (plot)	0,08	40	3,3	4	3					
déblais (m ³)	0,1	361	36	3	36					
remblais (m ³)	0,16	236	38	3	38					
Ossature (unités)	-	-	208	1	64					
placement poutres	3	16	-	1	16					
placement colonnes	4	40	-	1	40					
jonctions (m ³)	-	0	-	0	-					
contreventements	-	-	-	1	8					
Bardages	dépôt du bardage avec grue puis on étend									
toiture (m ²)	0,75	2705	2029	1	8					
parois latérales (m ²)	0,6	1958	1175	4	4					

* pour un portique, on compte 5 coupes durant chacune ± 4 minutes (varie suivant l'ouvrier)

** comprend : écroulement de l'ossature, la découpe des éléments de structure, le chargement sur camion.

Tableau 5 - Engins de chantier de référence

Référence	Type	Consommation	Puissance
0	travail manuel	-	-
1	grue	50 à 60 litres/heure	100 à 250 kW
2	bétonnière	2,9 litres/heure	-
3	bulldozer	32 litres/heure	30 à 250 kW
4	aiguille vibrante	1,5 kWh	-

en atelier ou en centrale de préfabrication est comptabilisé dans l'étape d'élaboration du matériau.

Les principaux engins sélectionnés pour la réalisation des travaux de construction et de démolition sont définis au Tableau 5.

Cette liste n'est bien entendu pas exhaustive : les consommations des engins sont basées sur les données fournies par CORINAIR [10], en fonction de la puissance des engins. Enfin, le choix des engins dépend de : la disponibilité des engins de l'entreprise, la taille du chantier, la taille des éléments à manipuler, la flotte d'engins de l'entreprise, les conditions d'accès, la proximité de structures voisines, les caractéristiques géologiques des terrains,...

5. FACTEURS ÉCOLOGIQUES

Les facteurs écologiques produits par les matériaux et les constructions tout au long de leur cycle de vie concernent en ordre principal - et non exhaustif -

4.3.2 Utilisation des engins de chantier

Les quantités d'heures de travail du personnel et des engins sont totalisées dans le Tableau 4. Ce sont surtout les données qui concernent l'utilisation des engins sur chantier qui sont prises en compte ici : le travail réalisé

	Béton					Acier	Bois lamellé-collé
	ciment	sable	granulats	eau	adjuvants		
Origine des matières premières	locale	Pays-Bas	locale	locale	Suisse	Suède, Afrique du Sud	Scandinavie, Belgique
Mode d'extraction	fabrication*	pelleteuse	dynamitage, pelleteuse	pompage	industrie chimique	dynamitage, pelleteuse	abattage, ébranchage, débusquage, écorçage, sciage
Transport	péniche, camion	péniche, camion	péniche, camion	conduite	camion	bateau, péniche	camion
Fabrication	centrale à béton					haut-fourneau / aciérie	usine

* fabrication du ciment.

l'énergie, le transport, les émissions sous leurs formes solide, liquide ou gazeuse et l'utilisation des engins pour la mise en œuvre des matériaux.

Il faut être conscient du fait que, lorsque l'on parle de production d'énergie, sous forme de courant électrique par exemple, il faut prendre en compte non seulement la charge sur l'environnement induite par la combustion des agents énergétiques mais aussi celle qui est liée à la consommation d'énergie due à l'extraction d'énergie primaire, le traitement et le transport jusqu'à l'utilisateur : on parle alors de précombustion.

Les transports jouent un rôle important dans l'éco-bilan général. Il faudra spécifier les consommations moyennes, les distances parcourues ou les heures d'utilisation des différents moyens de transport. La pollution résultant de l'exploitation des moyens de transport affecte l'air, l'eau et le sol, et se traduit par des bruits et des vibrations.

Le Livre Vert de la Commission Européenne sur l'impact du transport sur l'environnement (1992) donne les chiffres comparatifs suivants, relatifs au transport sur le territoire européen, par camions, par trains et par bateaux (bateaux de 1 000-4 000 tpl de navigation intérieure ou fluvio-maritime), soit respectivement : 1 à 3 MJ/tonne.km, 0,6 à 1 MJ/tonne.km, 0,4 à 0,6 MJ/tonne.km, en fonction de la taille et du type de fret.

Les émissions provoquées par les moyens de transport contiennent principalement [4] : le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde de carbone (CO) et les particules fines, telles que suies et cendres, résultant de la combustion du mazout et qui provoquent des pollutions locales (smog d'hiver).

Le transport contribue également directement à la pollution des eaux de surface par le déversement de déchets, les émissions de fluides (carburants, huiles,...). La pollution des sols résulte de l'utilisation de pesticides le long des routes ou encore de l'utilisation à grande échelle des sels de déverglaçage.

Le recensement pour chaque matériau employé et pour chaque étape de la vie de la structure les quantités d'énergie employées, a été fait [9] ainsi que le bilan des rejets solides, liquides et gazeux. Le calcul des écopoints a été réalisé relativement aux points suivants :

– les matériaux pris individuellement ;

– les structures « en pièces détachées », c'est-à-dire le bilan des matériaux non assemblés sur chantier ;

– la construction de la structure ;

– la démolition et/ou le démontage de la structure ;

– le transport des matériaux de démolition du chantier aux centrales de traitement ;

– le traitement des matériaux en vue d'un recyclage ou d'une réutilisation.

Un bilan global, calculé à partir de la somme des écopoints relatifs à chaque étape de la vie des constructions, permet de comparer l'impact environnemental des différents modes de construction.

6. DESCRIPTION DES ÉTAPES DU CYCLE DE VIE

6.1 Extraction des matières premières et élaboration des matériaux

Les étapes principales qui mènent à la fabrication du béton, de l'acier et du bois lamellé-collé sont reprises dans le Tableau 6². Il faut rappeler ici que les analyses qui sont réalisées sont à considérer dans le cadre spécifique de la Belgique, voire d'une région de Belgique.

6.2 Transport et construction

Le transport des matières premières est intégré à l'étape de fabrication des éléments de construction (poutres et colonnes en béton,...). Il s'agit donc ici du transport des éléments de construction vers le chantier. Les modulations possibles dans le transport se portent sur la situation géographique des fournisseurs ainsi que sur le mode de transport utilisé. Le cas le plus défavorable a ici été choisi : les camions ou les barges revien-

(2) Nous ne souhaitons pas ici décrire les étapes de l'élaboration des matériaux, par ailleurs bien connues, mais plutôt insister sur les techniques de mise en œuvre. Le lecteur se référera aux données fournies par les différentes fédérations industrielles (Fédération de l'Industrie Cimentière, Centre belgo-luxembourgeois de l'Information sur l'Acier et Fédération de l'Industrie du Bois) qui ont été rassemblées dans la référence [9].

nent à vide à leur point de départ. Dans la pratique, les transporteurs tentent de réaliser des circuits de chargement-déchargement mais cela reste néanmoins aléatoire. Les distances parcourues seront donc ici doublées (aller-retour). Ce poste reste sensiblement le même, quel que soit le type de matériaux ou d'élément de construction employé [3].

La manutention (construction) a été examinée dans le chapitre relatif au dimensionnement : ce sont les heures de travail, et donc les temps d'utilisation d'engins, qui seront considérés.

6.3 Exploitation et entretien

Pour une durée de vie de 25 ans, on peut estimer qu'un béton correctement composé et mis en œuvre, et placé dans des conditions normales d'utilisation, ne nécessitera pas de traitement ultérieur.

L'acier des poutrelles, intérieures, ne doit pas subir d'entretien, dans des conditions normales d'utilisation du hall. Il est bien évident que si le hall devait stocker des produits corrosifs, des précautions particulières devraient être prises pour la protection et l'entretien de l'acier. Il est à remarquer de plus que l'aspect protection incendie par application de peinture intumescente n'a pas été examiné. L'acier de bardage est conçu pour tenir pendant ce laps de temps. À nouveau sous des conditions particulières, des facteurs extérieurs pourraient accentuer la corrosion de la couverture. Il faut garder à l'esprit que la qualité de l'ouvrage est en relation directe avec la qualité des travaux réalisés en atelier, sur chantier et en bureau d'étude.

De la même façon, la structure en bois lamellé-collé, dans la mesure où elle est située à l'intérieur du hall, ne nécessite pas d'entretien particulier.

6.4 Démolition, démontage et recyclage

Les techniques de démontage et de démolition des constructions varient en fonction des matériaux employés : s'il apparaît relativement aisé de démonter les structures en acier et en bois lamellé-collé, les éléments en béton armé ou précontraint sont le plus souvent assemblés rigidement et, de ce fait, indémontables.

Pour cette étude, et de façon prospective, nous avons considéré un développement permettant d'admettre un taux de recyclage du béton de 75 %.

Les bardages sont en général après démontage, retournés en aciérie électrique et sont complètement recyclés. Les aciers d'armatures, après démantèlement complet des contamineurs (terre, béton,...) sont aussi envoyés en aciérie pour être recyclés.

Les aciers de poutre, de colonne, s'ils sont en état

acceptable, peuvent être revendus à moindre prix comme acier de second emploi (qui devront préalablement être repeints, sablés, etc). Dans ce cas, leur cycle de vie n'est pas prêt de s'achever. Mais en général, l'entière de l'acier est refondue en aciérie électrique comme les deux types d'aciers précédents.

Les poutres en bois lamellé-collé peuvent quant à elles être : broyées et utilisées comme litières ou dans les panneaux agglomérés, brûlées en centrales de combustion ou réutilisées en tant que poutres dans une nouvelle construction.

7. CALCUL DES ÉCOPOINTS

Il est impossible d'entrer ici dans tous les détails de calculs relatifs à chacune des étapes. Comme indiqué précédemment, le calcul des écopoints a été réalisé en relation avec les étapes suivantes :

- production d'un m³ de béton en faisant la distinction entre fondation, colonne et poutre;
- production d'une tonne d'acier et d'un m³ de bois lamellé-collé;
- intégration des quantités nécessaires à l'édification du hall;
- transport des matériaux;
- utilisation des engins pour la construction et la démolition;
- transport des déchets de démolition;
- traitement des déchets de démolition.

Le bilan des écopoints par type de structure (Tableau 7) et par type de matériau (Fig. 3) sont présentés ci-après.

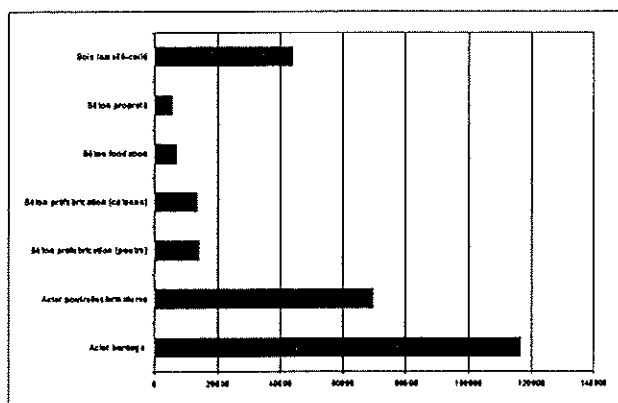


Fig. 3 - Bilan environnemental des différents matériaux (écopoints/tonne).

Étape	Hall acier		Hall béton		Hall béton et bois	
	Écopoints	Proportion	Écopoints	Proportion	Écopoints	Proportion
Fabrication matériaux	18563659	74	24091677	80	17859094	80
Transport matériaux	322165	1	1349207	4	474557	2
Montage structure	5396676	21	3216607	11	3216607	14
Démontage - démolition	271273	1	632956	2	361689	2
Transports déchets	137912	1	530596	2	295353	1
Traitements des déchets	348056	1	309581	1	253640	1
Total	24949741	100	30130624	100	22460940	100

Il est à ce moment possible de réaliser une analyse de l'importance proportionnelle de chaque poste ou étape dans le cycle de vie de la construction, en se basant sur des nombres ou valeurs définis par les mêmes unités.

8. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'interprétation des résultats ne peut se faire que si l'on est conscient des hypothèses suivantes :

- les données, et par conséquent les résultats, sont propres à une situation géographique et économique donnée ; il serait donc illusoire, voire même fallacieux, de généraliser ces résultats à d'autres régions ou à d'autres situations économiques et environnementales ;
- les résultats sont valables pour le type de structure étudié.

Les figures qui suivent permettent donc de se faire une opinion quant à l'aspect polluant de telle ou telle structure ; mais il faut bien garder à l'esprit que le manque ou l'imprécision de certaines données peut faire pencher la balance environnementale en faveur d'un matériau ou d'une structure. La Fig. 4 permet d'observer la répartition des écopoints en fonction des principales étapes du cycle de vie des 3 structures.

Il apparaît clairement que l'étape d'élaboration et de fabrication des matériaux présente un poids important, voire prépondérant, dans l'évaluation globale de l'impact environnemental des constructions, respectivement 75 % pour les structures en acier et 80 % pour les structures en béton et en lamellé-collé/béton ; plusieurs auteurs avaient déjà mis ce point en évidence. Mais on notera également que l'étape relative au montage de la structure s'avère également grande consommatrice d'écopoints, respectivement 21, 11 et 14 % pour les structures en acier, béton et en bois lamellé-collé.

C'est donc bien au niveau de ces deux étapes qu'il faut agir pour réduire effectivement l'impact sur l'environnement global de ces structures.

La comparaison entre les écopoints relatifs à l'élaboration des matériaux pris de façon isolée (Fig. 3) ne permet cependant pas de donner une préférence – du point de vue environnemental – à l'un de ces matériaux car, si l'acier possède un bilan plus élevé en écopoints, le béton quant à lui nécessite plus de matériaux pour une même capacité portante. Il faudrait donc établir des relations entre les résistances et les quantités de matériaux mis en œuvre.

9. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'analyse de cycle de vie est un outil complémentaire à ceux classiquement utilisés par les ingénieurs : elle apporte un nouvel éclairage dans le choix des matériaux et des structures. Utilisée afin d'introduire la notion d'impact environnemental global, elle permet de classer, et donc de comparer sur une échelle quantitative, les choix de matériaux et les techniques de construction. En ce sens, et idéalement, elle permet de choisir l'« éco-structure », c'est-à-dire la structure présentant un impact environnemental

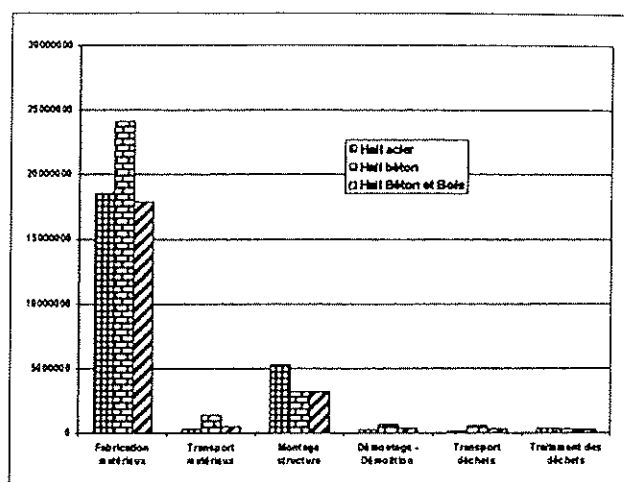


Fig. 4 – Répartition des impacts environnementaux (écopoints/hall entier).

global minimum. L'analyse de chaque étape de la vie de la structure permet d'autre part de tirer des conclusions quant à l'effet des méthodes de fabrication, de transport ou encore de recyclage, en désignant les endroits ou étapes où agir pour rendre le matériau ou la méthode de mise en œuvre ou de démolition plus « compatible » avec les objectifs du développement durable.

Les résultats présentés dans le cadre de cette étude ne doivent cependant pas être considérés en valeur absolue. Plusieurs facteurs doivent en effet être précisés ou définis afin de rendre cette analyse plus performante : normes de rejets évolutives, mesures et observations imprécises, méthodologie d'analyse de cycle de vie à améliorer, ...

La collecte de ces informations et le développement d'une méthodologie parfaitement adaptée au problème de la construction sont deux objectifs fondamentaux à poursuivre. Intégrer la notion de « structure complexe » dans les bases de données LCA constitue un autre but, dans la mesure où, souvent, elles ne considèrent pas le fait que « la complexité d'un système est plus importante que la somme des complexités des différentes parties de ce système ». Or, dans le cas d'une construction, le choix d'un matériau intervient et interagit à plusieurs stades de la vie de la construction. D'autre part, ces perspectives vont résolument dans le sens de la Directive européenne sur les Produits de Construction (CPD, Directive 89/106/CEE du 21/12/88) qui intègre, dans ses exigences essentielles, les notions de protection de l'environnement et de santé publique. Enfin, les concepteurs de projets pourront intégrer l'aspect environnemental dans leurs analyses et évaluations, ce qui reste encore trop peu souvent envisagé à l'heure actuelle : c'est simplement une question de choix dans l'optique d'un développement durable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] 'Les écobilans comparés dans l'argumentaire bois', Le Courrier du Bois, (Ed. Centre Interfédéral d'Information sur le Bois a.s.b.l.), 39^e année, 2^e trimestre, Bruxelles (1999).
- [2] Monfort-Windels, F., 'Recyclage des produits manufacturés : le recyclage mécanique des polymères', *European Journal of*

- Mechanical and Environmental Engineering* 42 (1) (1997), 32-40.
- [3] Bossink, B. A. G. and Brouwers, H. J. H., 'Construction waste: Quantification and source evaluation', *Journal of Construction Engineering and Management* 122 (1) (1996), 55-60.
- [4] 'Bateaux de navigation intérieure et pollution', Rapport du Groupe de travail N° 14 du Comité Technique Permanent I, (AIPCN, Bruxelles, 1999) 6-18.
- [5] Cramer, J., 'Life Cycle Analysis: results of some case studies', in 'Environmental Aspects of Construction with Waste Materials', Proceedings of an International Conference, Maastricht, 1989 (Ed. Elsevier, London, 1989) 17-28.
- [6] Hendriks, C. F. *et al.*, 'A new LCA-based calculation model to determine sustainability of products and services', in 'Workshop on Use of Recycled Materials as Aggregates in the Construction Industry', Proceedings of 1st ETNRecy.net/RILEM, Paris, 2000, 5 pp.
- [7] Vold, M. and Ronning, A., 'LCA of Cement and Concrete-main report', (Stiftelsen Osfoldforskning, Fredrikstad, 1995).
- [8] 'Bâtir avec l'environnement', in 'Actes du Colloque', Paris, 9 mars 1999.
- [9] Rademaker, Ch., 'Application de la notion de Life Cycle Analysis aux éléments de constructions industrielles (béton, acier, bois)', Travail de fin d'études (Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 1996).
- [10] Corinair, Emission Inventory Guidebook (mai 1995).
- [11] Rahlwes, K., 'Recycling of Reinforced Concrete Structures and Building using Composite construction: approach to an environmental-economic assessment', Demolition and Reuse of Concrete (Ed. E.K. Lauritzen, 1994).
- [12] Broklesby, M. W. and Davison, J. B., 'The environmental impacts of concrete design, procurement and on-site use in structures', *Construction and Building Materials* (14) (2000), 179-88.
- [13] Edwards, S. and White, R., 'LCA: a tool for the environmental impact assessment of recycling', in 'Workshop on Use of Recycled Materials as Aggregates in the Construction Industry', Proceedings of 1st ETNRecy.net/RILEM, Paris, (2000), 5 pp.
- [14] OFEFP, 'Bilan écologique des matériaux d'emballage, état en 1990', Cahier de l'Environnement (132) (1991), Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et des Paysages, Berne.
- [15] OFEFP, 'Méthodologie des Éco-bilans, sur base de l'optimisation écologique', Cahier de l'Environnement (133) (1991), Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et des Paysages, Berne.
- [16] Desmyter, J. *et al.*, 'Towards sustainability with construction and demolition in Belgium?', in 'Waste Materials in Construction (Wascon '91)', Proceedings of the International Conference, 10-14 Nov. (Ed. J. J. Goumans, Maastricht, 1991).
- [17] Econotec, 'Emissions de CO₂ en Belgique à l'horizon 2000-2005 (scénario de référence)', (Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles, 1995).