

Matériaux pour l'énergie / Materials for Energy

Impact carbonique et énergétique de capteurs solaires thermiques plans

P. D'Ans¹, G.G. Descy², P. Sun² et M. Degrez¹

¹ Université Libre de Bruxelles (ULB)/École Polytechnique, Service 4MAT, 50 avenue F.D. Roosevelt, CP 194/3, 1050 Bruxelles, Belgique,
e-mail : pdans@ulb.ac.be ; mdegrez@ulb.ac.be

² ESE s.a., 39 Parc Industriel, 5580 Rochefort, Belgique
e-mail : ggd@ese-solar.com ; philippe.sun@ese-solar.com

Mots-clés :

Capteur solaire thermique ; inventaire de cycle de vie (ICV) ; énergie grise ; émissions de gaz à effet de serre ; éco-conception

Résumé – Le bilan environnemental (carbone, énergie) de trois capteurs solaires thermiques produits en Belgique de 1979 à nos jours est proposé, en tenant compte des postes suivants : la production des matières premières, leur mise en forme. Les impacts respectifs de chaque fraction de matériau sont évalués. Le bilan est comparé avec les performances de ces capteurs, qui permettent de réduire la consommation en énergies fortement émettrices de CO₂. Le temps de retour énergétique s'améliore sur le long terme, grâce à une meilleure sélection des matériaux. Le bénéfice de la réutilisation de certains composants est évalué, en tenant compte de la facilité de démontage.

Key words:

Solar thermal collector; life-cycle inventory (LCI); embodied energy; greenhouse gas; eco-conception

Abstract – CO₂ and energy balance of thermal solar collectors. The environmental balance (carbon footprint, primary energy) of three thermal solar collectors produced in Belgium from 1979 to now is presented; it accounts for the raw materials production and their manufacturing. The impact of each component is assessed. These impacts are then compared with the performance of these collectors, which reduce the consumption of carbon-intensive primary energies. The energy payback time turns out to decrease from the oldest to the newest collector, thanks to a better selection of the materials. The possible benefit or reusing some components is assessed, depending on the ease of dismantling.

Reçu le 5 juillet 2011
accepté le 13 mars 2012

Dans le cadre du passage progressif à une économie basée sur les énergies renouvelables, l'énergie solaire s'avère être un remplaçant potentiel des énergies conventionnelles. En particulier, l'énergie solaire dite « thermique », qui convertit directement des rayons solaires en énergie thermique, est adaptée pour la production d'eau chaude sanitaire, voire même (mais il s'agit encore essentiellement de recherches) pour le chauffage central des habitations.

L'énergie solaire thermique présente des qualités indiscutables, telles que la simplicité des installations (du moins pour l'eau chaude sanitaire), leur robustesse et leur faible coût. De plus, cette technologie émet très peu de gaz à effet de serre, leurs sources

étant la production des capteurs et, dans une bien moindre mesure, leur utilisation et la quasi absence d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation.

Cependant, la fabrication de ces systèmes requiert des matériaux dont la production n'est pas neutre sur le plan environnemental. Plusieurs inventaires et analyses de cycle de vie ont été réalisés par le passé sur de tels capteurs produisant de l'eau chaude.

Par exemple, des études ont porté sur les émissions de SO₂ et de NO_x [1,2], ainsi que de gaz à effet de serre [1–3], le temps de retour sur investissement par rapport à l'énergie [4–6], voire une combinaison plus complète d'impacts environnementaux [7–10].

Si la plupart des conclusions de ces études avancent l'avantage environnemental de l'utilisation de tels systèmes par rapport aux énergies conventionnelles, l'ampleur du gain varie selon les hypothèses de l'étude, dont la composition des capteurs et leur emplacement géographique, qui conditionne leurs performances. S'agissant du temps de retour sur investissement énergétique, les auteurs rapportent des valeurs comprises entre 6 mois et un an [4], de moins de 20 mois [8] ou de 1 à 5 ans [6]. A noter, toutefois, Diakoulaki et al. estimaient, dans le contexte de 2001, que le gaz naturel était plus avantageux pour la production d'eau chaude sanitaire, en faisant une étude coût/bénéfice prenant en compte certains aspects sociaux, et après monétarisation des impacts [2].

Dans ce travail, les performances environnementales de capteurs produits et utilisés dans le contexte belge ont été évaluées. Les objectifs de l'étude sont multiples :

- Comparer trois générations de capteurs plans pour eau chaude sanitaire, produits par la société ESE s.a.
- Identifier des améliorations possibles, surtout en termes de matériaux.
- Effectuer une première étape en vue d'une évaluation environnementale de capteurs similaires, mais couplés à un système de stockage thermochimique de l'énergie, qui permettra le chauffage central des habitations (projet SOLAUTARK, Région Wallonne de Belgique).

1 Méthodologie et champ de l'étude

Trois capteurs ont été étudiés, un prototype de 1979 (type I), un produit en 2004 (type II : Ecosol 2.32, 1^{re} génération) et un produit en 2009 (type III : Ecosol 2.32, 2^e génération). Les types I et II ont fait l'objet d'un démantèlement après une période d'utilisation de 30 ans et de 5 ans, respectivement. Outre l'identification des différentes fractions, ce démantèlement avait pour objectif d'identifier les freins à une valorisation optimale en fin de vie. Le type III a été analysé sur base des données de production. Les masses des composants respectifs ont été inventoriées pour les trois modèles.

Cette étude n'est pas une analyse de cycle de vie, mais un inventaire de cycle de vie partiel, le calcul d'impacts n'étant pas réalisé. Pour chaque étape étudiée, les rejets de CO₂ et les consommations en énergie primaire sont évalués. Les limites du système sont représentées à la figure 1. La production des différents composants est prise en compte, y compris, dans la mesure du possible, la mise en forme. La production du traitement de surface de l'absorbeur, qui demande en soi une étude spécifique, n'a pas été prise en compte, mais sera réalisée ultérieurement. Les matériaux d'entrée possèdent des taux de recyclage les plus représentatifs possibles. En résumé, à l'assemblage près, ce calcul représente un bilan au niveau de l'usine productrice, les étapes de production/montage situées en aval n'étant pas incluses dans l'étude. Le choix des frontières du système permet une comparaison des options constructives entre les différents capteurs, sachant que les tuyauteries, la consommation de l'éventuelle pompe de circulation et le boiler peuvent être identiques dans les trois scénarii.

L'unité fonctionnelle est le m² de capteur. Certains résultats sont ramenés au kWh produit. Les différences constructives ne sont pas de nature à engendrer de différences de durée de vie ; la fin de vie de ces capteurs est généralement dictée par des rénovations majeures du bâtiment ou des phénomènes accidentels, tels que des jets de projectiles.

L'énergie primaire est comparée à la production annuelle de chaleur par les capteurs. Le temps de retour sur investissement énergétique est calculé : il représente le temps nécessaire au capteur à produire autant d'énergie qu'il n'en faudrait pour produire l'ensemble de ses composants :

$$\tau = \frac{E_{\text{primaire}}}{\dot{E}_{\text{produite}}}$$

où E_{primaire} est l'énergie primaire consommée tout au long de la vie du panneau et $\dot{E}_{\text{produite}}$ est l'énergie produite annuellement par le capteur. Cette grandeur représente sensiblement le temps d'amortissement par rapport au système de chauffe-eau classique, pour autant que :

- La circulation du liquide se fasse sans pompe, par simple thermosiphon.

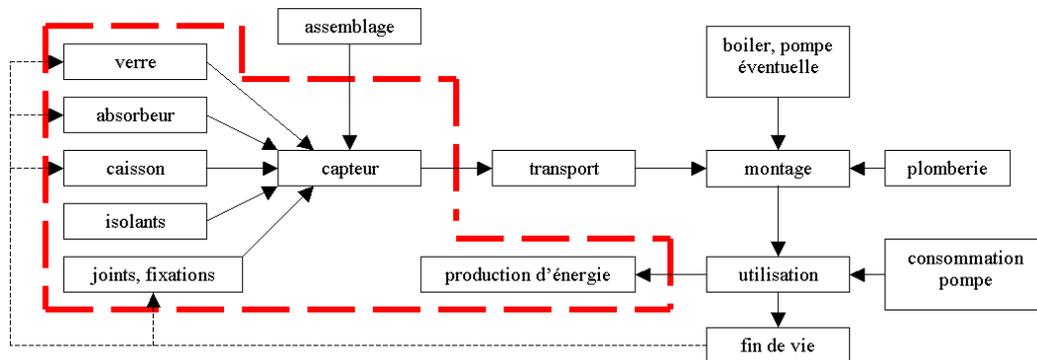


Fig. 1. Limites du système étudié, en traits gras pointillés. Les traits pointillés fins indiquent les possibilités de recyclage en fin de vie.

Fig. 1. Borders of the studied system, in dashed thick line. The dashed thin lines represent recycling options.

- Le boiler soit le même que celui utilisé dans le cadre du chauffe-eau classique.
- Le complément de plomberie nécessaire pour relier le capteur au reste de l'installation de chauffage de l'eau soit limité.
- L'ensemble des étapes de montage et de transport occasionnés par la présence du capteur puisse être négligé.

Les données relatives aux matériaux du capteur de type I (1979) sont actuelles et non d'époque. Le calcul est donc représentatif de ce qu'engendrerait la production de ce capteur aujourd'hui.

2 Inventaire

Lors du démontage, peu de difficultés de séparation des différents éléments ont été rencontrées. Toutefois :

- Dans les capteurs de type I, le cuivre de l'absorbeur est fortement contaminé, du fait de la présence d'une brasure étain-plomb qui fixe les tubes de liquide caloporteurs à l'ailette de l'absorbeur. De plus, l'absorbeur est recouvert d'un traitement de surface épais, constitué d'une couche de nickel et d'une couche de chrome électrolytiques. Enfin, l'absorbeur de type I ne peut être extrait qu'après avoir été plié : il est, en effet, encastré dans le caisson, avec les risques d'endommagement que cela présente, au cas où on souhaiterait le récupérer tel quel en fin de vie.

- Dans le capteur de type II, il est difficile de séparer le verre, la colle et le joint d'étanchéité.

Dans le tableau 1, sont consignées les masses des différents composants pour les trois modèles de capteurs étudiés, ainsi que les émissions de CO₂ et l'énergie grise par kg de matériau. Ont été négligés, un ensemble de matériaux métalliques ou polymères, essentiellement des fixations, dont la masse totale n'excède pas 50 g (passe-fils, fixations de tuyauteries, écrous, rivets). Une quantité visiblement réduite de colle a été utilisée aux quatre coins du caisson des capteurs de type II et III ; elle a également été négligée. La brasure (type I) et les traitements de surface de l'absorbeur sont inclus dans le poste « cuivre ».

La figure 2 compare les énergies grises contenues dans les trois capteurs étudiés, ainsi que les masses de dioxyde de carbone émises directement ou indirectement lors de la production de leurs matériaux constitutifs. On constate que, chronologiquement, l'impact des capteurs produits a diminué au cours du temps, de l'ordre d'un facteur 3, tant pour l'énergie primaire que pour le CO₂.

La proportion d'énergie grise et de CO₂ associée à chaque matériau est donnée aux figures 3 et 4, pour chaque capteur.

3 Interprétation

Le bilan énergétique permet de calculer le temps de retour sur investissement énergétique. Si l'on suppose une énergie produite

Tableau 1. Données « matériaux » du calcul des bilans carbone et énergie.

Table 1. Materials data used for the energy and CO₂ balances.

Composant	Matériau	Masse (kg)			Energie primaire (MJ/kg)	CO ₂ émis à la production (g CO ₂ /kg)	Réf.
		Type I	Type II	Type III			
Caisson	Aluminium laminé	11,2	6,77	–	145	10400	[11]
	Acier laminé (filrière thermique)	–	–	11,1	16,2	1587	[12]
	Polyisocyanurate (PIR)	7,63	0,43	3,2			[13]
Isolation	Polyuréthane (PUR)	1,25	–	–	110	4100	[13]
	Laine de roche	2,1	4,6	2,3	12,7	1065	[14]
Absorbeur	Cuivre	11,4	6,38	6,38	31,2	2020	[11]
Vitrage	Verre plat	24,4	23,0	23,0	12,6	551	[11]
	Silicone	0,005	0,05	0,14	160	8600	[13]
Joints	Caoutchouc	1,01	–	–	92	3100	[13]

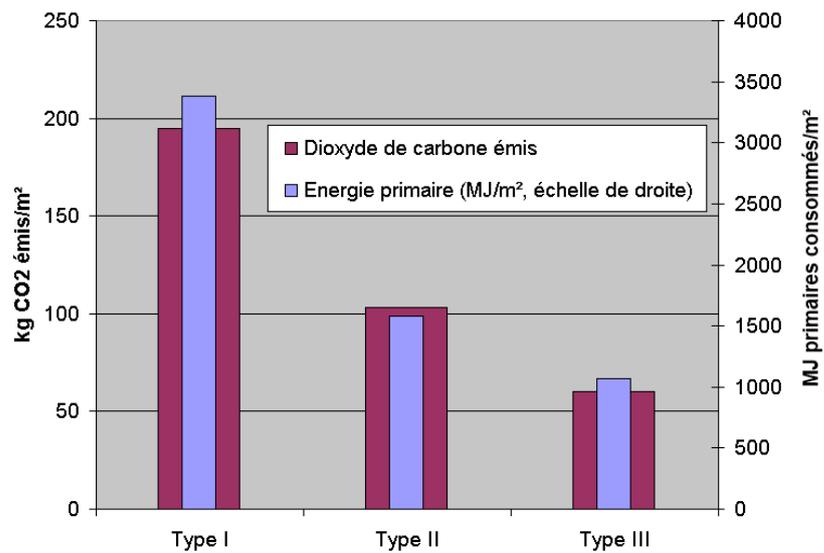


Fig. 2. Comparaison des types de capteurs étudiés, à superficie identique.

Fig. 2. Comparison of the studied solar collectors, per area unit.

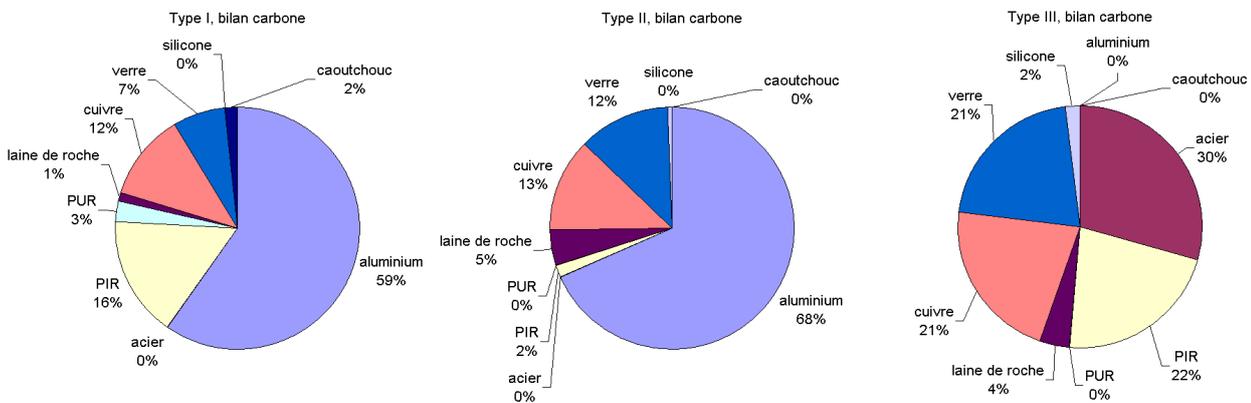


Fig. 3. Bilan CO₂ des types des capteurs étudiés.

Fig. 3. CO₂ balance of the studied collectors.

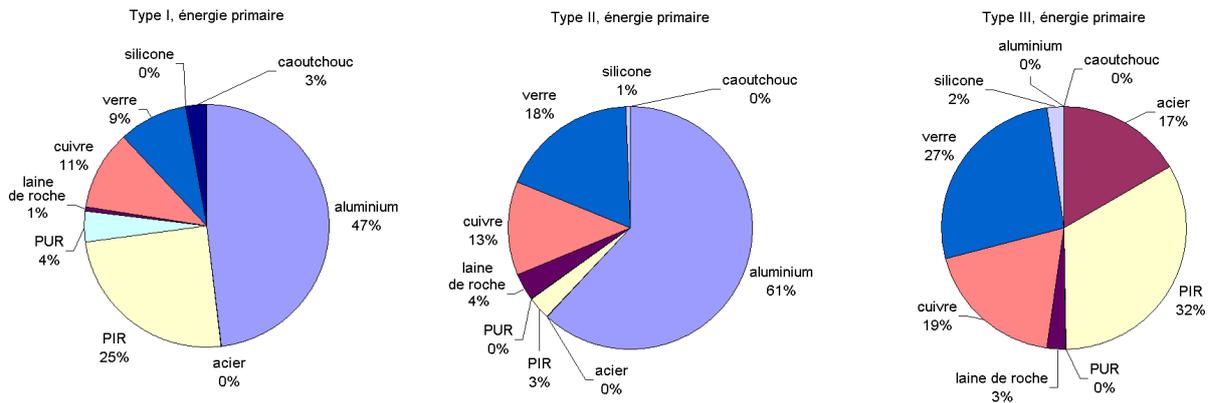


Fig. 4. Bilan de l'énergie primaire nécessaire à la fabrication des capteurs étudiés.

Fig. 4. Primary energy balance of the studied collectors production.

de $1600 \text{ MJ m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, qui est une valeur de référence pour la Belgique, on trouve des temps de retour de 13, 5 et 3 mois, pour les types I, II et III, respectivement. À titre de comparaison, le capteur de type I démantelé pour cette étude assurait encore sa fonction au moment du démantèlement, 30 ans après sa production. Ces capteurs sont donc clairement « rentables » et il semble peu probable que les termes omis dans le calcul (traitements de surface, assemblage/montage) changent drastiquement ce résultat.

La décroissance du coût énergétique et du coût carbone entre les différentes générations de capteurs va de pair avec des coûts financiers mieux maîtrisés, en particulier :

- La réduction de la masse de l'absorbeur en cuivre, entre le type I et le type II.
- Le remplacement de l'aluminium par de l'acier pour le caisson, entre le type II et le type III. L'inconvénient est une masse plus élevée posée sur la toiture, mais le surplus est compensé par la réduction de la masse de l'absorbeur.

Une autre amélioration, située à la transition entre le type I et le type II, mais invisible dans le bilan, est la moindre contamination du cuivre, qui facilite son recyclage en fin de vie :

- La brasure à l'étain-plomb, entre l'ailette et les tubes, est remplacée par une soudure à ultrasons.
- Le passage, pour la couche absorbante, d'un revêtement épais à un revêtement mince.

Le remplacement partiel des mousses polymères isolantes entre les types I et II a permis d'améliorer la performance environnementale. Le retour à davantage de polyisocyanurate s'est traduit, dans le type III, par la réapparition d'une contribution significative de l'isolant (Figs. 3 et 4). Toutefois, le choix et la disposition des isolants dans le caisson peuvent influencer les performances totales, effet qui n'a pas été pris en compte.

Les joints d'étanchéité n'apportent pas une contribution significative. Cependant, leur caractère plus ou moins récalcitrant lors de la séparation en fin de vie peut remettre en cause la réutilisation éventuelle de certaines parties.

Si l'on suppose une durée de vie moyenne de 20 ans, les émissions de CO_2 associées à la production d'un kWh sont de 11, 5 et 2,9 g/kWh de chaleur en sortie de capteur, soit des valeurs particulièrement faibles. À titre de comparaison, le réseau électrique belge émet 330 g CO_2/kWh d'électricité et une chaudière à condensation émet 270 g CO_2/kWh de chaleur.

Pour améliorer encore ces valeurs, qui supposent des taux de recyclage typiques mais pas de la réutilisation, les pistes suivantes pourraient être explorées :

- Réutilisation du verre pour fabriquer un second capteur.
- Réutilisation du caisson.
- Réutilisation des isolants.

Ces trois composants ne pourraient toutefois être récupérés tels quels que si le nouveau capteur à constituer après 20 ans possède

exactement les mêmes dimensions (modularité). De plus, concernant les isolants, si leurs propriétés isolantes semblent conservées après 20 ou 30 ans, leur manipulation demandera des précautions, afin qu'ils conservent leur intégrité.

Supposons :

- Qu'un second capteur de performances identiques puisse être fabriqué après 20 ans, en réutilisant ces trois composants.
- Que tous les autres composants soient obtenus comme précédemment.
- Que l'opération n'engendre pas une contribution significative du transport.
- Que la durée de « seconde » vie soit de 20 ans.
- Que tous les composants doivent être recyclés à la fin ce second cycle.

Sous ces hypothèses, on peut calculer la quantité de CO₂ émise pendant ces 40 ans et, ainsi, évaluer le gain théorique de la modularité. Tous calculs faits, on trouve 1,8 g CO₂/kWh, soit un gain théorique de 38 %.

Deux autres sources potentielles d'amélioration du bilan peuvent être identifiées :

1. Faire en sorte que certains composants du capteur constituent également un matériau constitutif de la toiture du bâtiment ou, en cas d'intégration des capteurs en façade, de la façade elle-même.
2. Remplacer le cuivre de l'absorbeur par de l'acier. Toutefois, l'ailette a pour fonctionnalité de conduire la chaleur absorbée. L'acier étant moins conducteur que le cuivre, l'épaisseur devra être revue à la hausse. De plus, les tubes ne pourront pas non plus être conçus de la même façon. Une estimation du gain ne peut donc pas être faite à ce stade.

4 Conclusions

Après exclusion des traitements de surface et de la plomberie extérieure qu'ils requièrent, les derniers capteurs solaires thermiques ont nécessité l'émission de 26 kg de CO₂ et une énergie primaire de 460 MJ environ, par mètre carré, à la production. Ceci leur confère un temps de retour sur investissement énergétique inférieur à un an. Cette

bonne performance résulte de l'amélioration sur le long terme de la sélection de leurs matériaux constitutifs (acier) et des masses mises en jeu (cuivre).

Le kWh produit engendre l'émission de 2,9 g de CO₂. Une meilleure modularité, un autre choix de matériau pour l'absorbeur, de même qu'une meilleure intégration du capteur dans le bâtiment pourraient améliorer encore ce score. Mettre en œuvre et étudier ces possibilités constitue une première perspective.

Une seconde perspective serait de constituer une analyse de cycle de vie complète, avec prise en compte de l'ensemble des consommations et émissions, ainsi qu'une étude des impacts plus complète.

Dans ce travail, la production d'énergie par unité de surface a été fixée. Toutefois, elle pourrait être améliorée en plaçant l'intérieur du capteur sous vide, au prix d'étapes de production et de pièces supplémentaires. Une troisième perspective pourrait donc être d'étudier l'impact du passage sous vide et de déterminer si le gain de performance est comparativement significatif.

Enfin, dans le cadre du projet SOLAU-TARK, des capteurs couplés à un système de stockage inter-saisonnier de l'énergie seront étudiés.

Remerciements

Les auteurs remercient la Région Wallonne de Belgique pour le financement : projet SOLAU-TARK, convention No. 6058, mis en œuvre par le Pôle MECATECH (2009–2013).

Références

- [1] S. Mirasgedis, D. Diakoulaki, D. Assimacopoulos, *Renewable Energy* 7 (1996) 329-338
- [2] D. Diakoulaki, A. Zervos, J. Sarafidis, S. Mirasgedis, *Energy Conversion and Management* 42 (2001) 1727-1739
- [3] S.A. Kalogirou, *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 3075-3092
- [4] R.H. Crawford, G.J. Treloar, *Solar Energy* 76 (2004) 159-163
- [5] F. Buttinger, thèse de doctorat, Technischen Universität München, 2009
- [6] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, V. Lo Brano, *Renewable Energy* 30 (2005) 109-130

- [7] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, V. Lo Brano, *Renewable Energy* **30** (2005) 1031-1054
- [8] R. Battisti, A. Corrado, *Journal of Cleaner Production* **13** (2005) 1295-1300
- [9] N.A. Masrurah, *Renewable Energy* **31** (2006) 537-548
- [10] G. Tsilingiridis, G. Martinopoulos, N. Kyriakis, *Renewable Energy* **29** (2004) 1277-1288
- [11] ADEME, *Bilan Produit*, http://www.ademe.fr/internet/bilan_produit/login.asp
- [12] A.-M. Iosif, F. Hanrot, J.-P. Birat, *International Journal of Life Cycle Assessment* **15** (2010) 304-310
- [13] GrantaDesign, Cambridge Selection Software : CES EduPack 2009 (Eco Selector), 2009
- [14] J.R.C. European Commission, Institute for the Environment and Sustainability, *ELCD Database*, (dernière consultation : 15 juin, 2010)