

Laitiers de haut fourneau

Version mise en ligne en avril 2013

1 Unités fonctionnelles

Les données d'inventaire concernant les laitiers de haut fourneau sont définies en fonction du système que l'on étudie. Quatre échelles peuvent être identifiées pour les laitiers de haut fourneau. Les unités fonctionnelles correspondantes sont les suivantes :

- 1 tonne de fonte lors de la production primaire,
- 1 tonne de laitiers lors de leur élaboration, qui permet leur utilisation en technique routière (criblage...),
- La quantité de laitiers nécessaire pour la production d'1 tonne de matériau en phase d'utilisation (ciment, béton...),
- La quantité nécessaire pour construire 1m² d'infrastructure ou 1km d'une infrastructure définie (largeur et épaisseur).

En résumé, l'unité fonctionnelle à utiliser dépend de l'échelle du système étudié : soit par rapport au matériau produit, (par exemple la production d'une tonne de ciment), soit par rapport à la construction d'une infrastructure, (par exemple 1 km de voirie avec une largeur et une épaisseur donnée).

2 Présentation des procès donnant un ICV

2.1 Système de production primaire

Le système de production primaire des laitiers de haut fourneau (laitiers HF) correspond à la fabrication de fonte dans le haut fourneau, présenté dans la figure 1. Le système est séparé selon le procédé primaire, commun à la fonte et aux laitiers HF, et le traitement, propre aux laitiers HF.

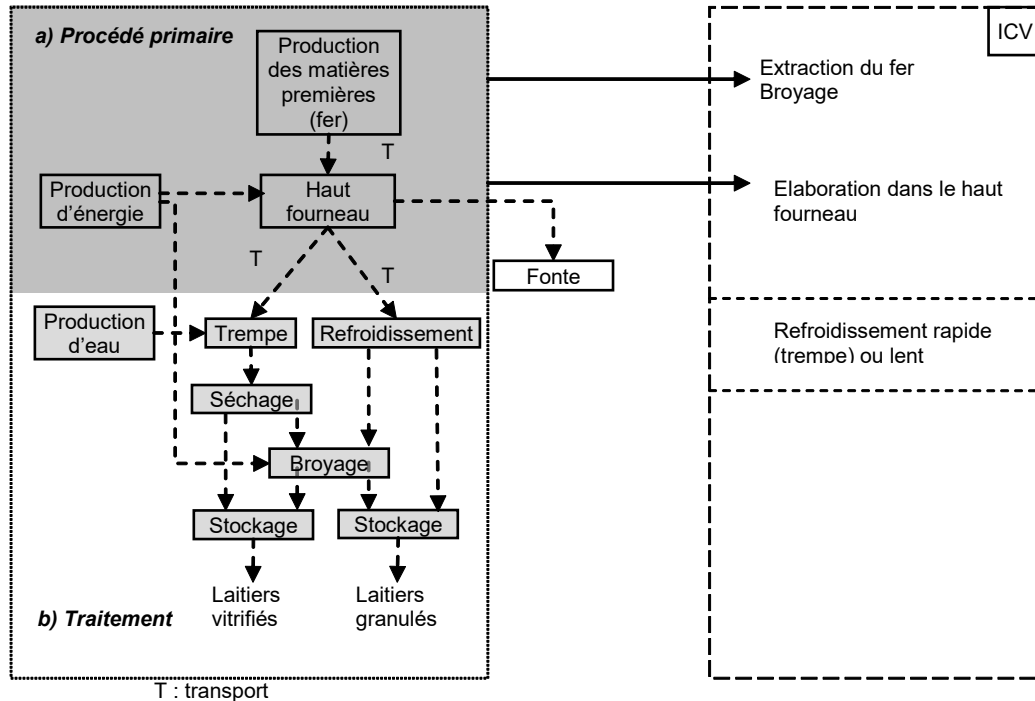


Figure 1 : Système de production primaire, d'après Chen, 2009.

Au niveau du procédé primaire (partie grisée **a**) sur la figure 1), l'unité fonctionnelle correspond à la production d'1 tonne de fonte. Pour la seconde partie **b**) du schéma), l'unité fonctionnelle peut être définie par unité massique de laitiers.

Selon leur mode de refroidissement, les laitiers n'auront pas les mêmes propriétés et pourront donc être utilisés de manière différente. C'est le cas des laitiers vitrifiés qui seront essentiellement utilisés en tant que liant, grâce à leurs propriétés hydrauliques (Sayagh, 2010).

2.2 Système d'utilisation

Une fois traités, les laitiers HF peuvent être utilisés de différentes manières dans les infrastructures de transport, illustrées par la figure 2.

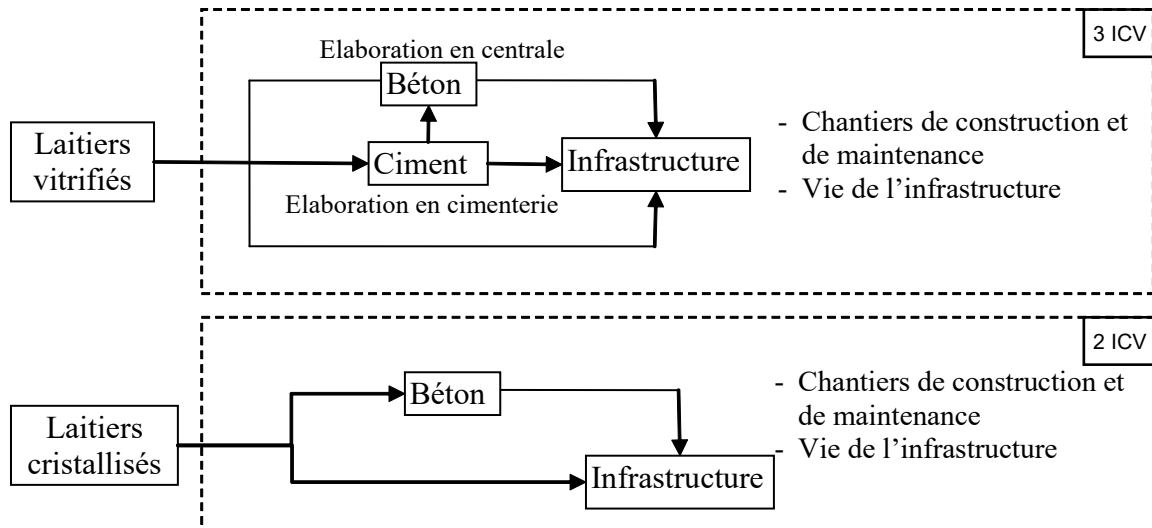


Figure 2 : Système d'utilisation des laitiers de haut fourneau vitrifiés et cristallisés

2.3 Analyse des inventaires

2.3.1 Laitiers cristallisés utilisés en granulat

L'analyse des inventaires concernant les laitiers cristallisés est présentée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Analyse des inventaires concernant l'utilisation des laitiers cristallisés en granulat

Etape du cycle de vie		Matières premières	Transport	Fonctionnement des équipements	Construction des installations	Entretien des installations	Prise en compte des flux liés à la production d'énergie	Stockage du produit
Fabrication des laitiers (Chen, 2009)		Extraction minerais	camion	(combustibles : électricité et charbon) ecoinvent	Haut fourneau (ecoinvent)	Boues, eau usagée (usée) et cendres en décharge	oui	
Traitement (Nouvion <i>et al.</i> , 2009)	I	2 bulldozers 2 chargeuses	6 dumpers	cribleur à 150 mm, concasseur à mâchoires, tamis			non	
	II			2 x 1 granulateur giratoire			non	
	III			2 x 2 granulateurs giratoires 2 x 4 tamis			non	

Le travail de Chen (2009, 2010) concerne les laitiers vitrifiés utilisés comme liants et/ou additif dans le ciment et le béton. Les procédés de fabrication sont identiques jusqu'à la sortie du haut fourneau. A ce moment, les laitiers cristallisés sont

directement entreposés dans leur lieu de stockage où leur refroidissement se fera lentement à l'air libre. Les données de Chen sur les procédés communs aux laitiers vitrifiés et cristallisés sont donc utilisables.

2.3.2 Laitiers vitrifiés utilisés en liant

L'analyse des inventaires concernant les laitiers vitrifiés est proposée au tableau 2.

Tableau 2 : Analyse des inventaires concernant l'utilisation des laitiers vitrifiés en liant

Etape du cycle de vie	Matières premières	Transport	Fonctionnement des équipements	Construction des installations	Entretien des installations	Prise en compte des flux liés à la production d'énergie	Stockage du produit
Fabrication des laitiers (Chen, 2009)	Extraction minerais	camion	(combustibles : électricité et charbon) ecoinvent	Haut fourneau (ecoinvent)	Traitement des boues et des eaux usées	oui	
Traitement (Chen, 2009)	Eau		Trempe, séchage, broyage Electricité, gaz, diesel		Eau usagée	Oui ?	En silo
Ciment (ATILH, 2011)	Pas d'allocation des flux de production des laitiers HF mais intégration du traitement ATILH (2011)	oui	Clinker : cuisson, trempe, refroidissement ... Ciment : broyage, séchage...	non	non	oui	

3 Données disponibles

3.1 Issues du procédés de production primaire

Le tableau 3 présente les procédés qui conduisent à la fabrication de fonte (production primaire) et à celle des laitiers HF. Ces derniers correspondent aux déchets de la production primaire, et correspondent à la définition réglementaire de sous-produits en raison de leurs débouchés. Ce tableau indique également les références de travaux d'ACV et d'inventaires disponibles.

Tableau 3 : Procédés de production de fonte et références ACV correspondantes

	Production / Stockage	Production du déchet	Devenirs du déchet
Processus	Extraction minerais Haut fourneau	Laitiers	Décharge Ciment Recyclage route Autre ?
Données ACV	Filière de production de fonte assez bien renseignée		Ciment : ATILH (2011)

3.2 Issues de transformation en lien avec l'utilisation

L'utilisation des laitiers HF produits, soit en cimenterie pour les laitiers vitrifiés, soit en agrégat pour les laitiers cristallisés, permet d'éviter leur mise en décharge après des tests de lixiviation (déchets non dangereux).

Dans ce paragraphe, seuls les procédés spécifiques au matériau «laitiers HF» sont considérés. Cela signifie que tous les flux de matières ou d'énergie liés à ces processus sont attribuables au matériau. Cette étape, appelée élaboration du matériau, consiste à traiter les laitiers HF pour pouvoir les utiliser en technique routière. Le tableau 2 présente ces procédés et les différentes utilisations possibles du matériau.

Tableau 1: Procédés d'élaboration du matériau, ses utilisations et données d'inventaires disponibles

	Production / Stockage	Elaboration / Stockage	Utilisation
Processus	Refroidissement : – brutal pour laitiers vitrifié (granulé ou bouleté) – lent pour laitiers cristallisé (crassiers)	Concassage, criblage Stockage dans silos	Béton bitumineux (granulat) Enduit Béton (granulat/liant/additif) Grave laitier (granulat et/ou liant) Remblais Remblais traités
Données ACV	Sayagh, 2007 Sayagh et al, 2010	Nouvion et al, 2009	Ciment : dans inventaires ATHIL (2011)

3.3 Issues de l inventaire

Les données de production de laitiers ne peuvent être trouvées dans des bases de données génériques (ecoinvent, ELCD) il est donc nécessaire de se référer à des travaux de la littérature sur ce sujet.

Pour l'utilisation en granulat, il est possible d'utiliser les mêmes données que pour les granulats naturels pour les étapes d'élaboration et de mise en place et de stockage. Les émissions potentielles vers les eaux souterraines et vers le sol sont sans objet pour ce matériau considéré comme inerte chimiquement.

Concernant l'utilisation de laitier de haut fourneau en remplacement de clinker dans le ciment, il faut se reporter aux inventaires disponibles pour leur usage. L'ATILH (association technique de l'industrie des liants hydrauliques) propose des inventaires pour des ciments en contenant (CEM II A/S, CEM III A et B). Aucune allocation des flux de production n'a été réalisée, seuls les flux liés à leur élaboration (trempe, broyage, séchage et mélange) et au transport ont été inclus (ATILH, 2011).

4 Bibliographie sur l'ACV sur l'utilisation des laitiers de haut fourneau

De manière générale, les laitiers HF sont considérés comme des sous-produits. Des bénéfices environnementaux sont généralement identifiés quand des laitiers HF sont utilisés par rapport au scénario classique.

L'étude de Lee (2005) recourt à la méthode d'expansion du système, comme recommandé par la norme ISO 14044 (2006). L'objectif consiste à identifier le scénario d'utilisation des laitiers HF vitrifiés qui maximiserait les bénéfices environnementaux. Les laitiers peuvent être utilisés en matière première pour le ciment Portland, en ciment de laitier, en liant hydraulique ou en fertilisant silicaté. L'évaluation environnementale est réalisée selon trois perspectives : l'évaluation des

émissions de CO₂, le potentiel de réchauffement global et la méthode EcoIndicator 99. Ces trois évaluations conduisent au même résultat, indiquant que les utilisations permettant de réaliser le plus de bénéfices environnementaux correspondent à celles qui font économiser du clinker (soit en ciment Portland ou en ciment de laitier).

Flower and Sanjayan (2007) ont travaillé sur les émissions de CO₂ au cours de l'étape de fabrication du cycle de vie du béton. Considérant que les laitiers HF vitrifiés granulés étaient un sous-produit de procédés qui auraient quand même lieu sans leur production, seules les émissions liées aux processus en aval de la production initiale ont été prises en compte : soit celles liées au captage, au broyage, à l'affinage et au transport (100 km) des laitiers. Cette situation correspond à une absence d'allocation des flux liés à la production pour les déchets. Dans ces conditions, ils obtiennent une réduction de 22 % des émissions de CO₂ lors de la production de béton pour une formulation-type. Cette approche, qui exclut toute allocation des flux liés à la production primaire, est également suivie dans l'étude de Mroueh (2001) sur l'utilisation de sous-produits en construction et dans celle de Prusinski (2007) concernant les bétons fabriqués à partir de ciment de laitiers. Ces deux études correspondent à des travaux d'inventaire du cycle de vie (ICV) et basent leurs conclusions sur l'évolution d'un nombre limité de flux (consommation d'énergie et émissions de substances dont le CO₂). Elles concluent également à une baisse des impacts environnementaux en cas d'utilisation de laitiers HF par rapport à un scénario classique.

Les travaux de Sayagh (Sayagh,2010) présentent une évaluation environnementale de trois types de chaussées, permettant de comparer leurs impacts : une chaussée en béton de ciment et deux chaussées à revêtement bitumineux, différenciée par l'utilisation de laitiers HF vitrifiés en sous-couche routière. Deux situations ont été

étudiées pour les laitiers : aucune allocation des flux liés à la production d'acier et une allocation massique entre l'acier et les laitiers, fournissant un coefficient d'allocation de 20%. Les indicateurs suivis correspondent aux impacts suivants : acidification, eutrophisation, toxicité, écotoxicité, potentiel de création d'ozone photochimique, potentiel de réchauffement global et consommation d'énergie et de ressources. Les résultats obtenus indiquent une économie en liants extraits de ressources naturelles, mais également une consommation supérieure de granulats. Ce dernier aspect est lié au fait qu'il est recommandé de réaliser des couches plus épaisses quand du laitier HF vitrifié est utilisé pour garantir les mêmes propriétés géotechniques. Tous les indicateurs suivis à l'exception de la toxicité sont très sensibles au choix d'hypothèse d'allocation des flux. L'ordre de classement des infrastructures selon leur impact est même modifié pour certains indicateurs (ozone photochimique, écotoxicité).

Chen *et al.* (2010) ont travaillé sur les procédures d'allocation pour les additions minérales dans le béton. L'objectif de ce travail était de comparer les impacts d'un ciment classique avec ceux d'un ciment contenant des laitiers en remplacement selon trois scénarios d'allocation des flux de production primaire. Ces scénarios correspondent soit à une absence d'allocation, soit à une allocation massique ou à une allocation économique. Onze indicateurs d'impact ont été calculés selon la méthode CML (2001) et les résultats obtenus sont les suivants :

- en absence d'allocation, les impacts calculés sont inférieurs à ceux du ciment CEM I pour les 11 indicateurs, avec un maximum pour l'écotoxicité aquatique avec 50% de l'impact du ciment ;
- en cas d'allocation massique, des impacts bien supérieurs (au minimum 119%) à ceux du ciment CEM I sont observés pour l'ensemble des indicateurs ;
- la situation est plus contrastée en cas d'allocation économique, avec un impact supérieur pour certains indicateurs dont principalement l'écotoxicité aquatique marine et d'eau douce, et un impact inférieur pour d'autres, par exemple le réchauffement climatique. Les résultats de ce type d'allocation dépendent du prix du sous-produit, indépendamment de l'importance des flux d'émission : pour un prix plus élevé, le sous-produit porte plus de flux et a donc des impacts sur l'environnement plus élevés.

La situation pour l'allocation économique est expliquée par les différences de procédés et de leurs impacts entre la production de ciment et des laitiers : moins d'émission de gaz à effet de serre par les haut-fourneaux, mais un impact supérieur sur les eaux pour l'extraction de minerai de fer que pour l'extraction de calcaire.

5 Références

- ATILH, 2011 : Module d'informations environnementales de la production de ciments courants. 28 p. Disponible sur : <http://www.infociments.fr/developpement-durable/construction-durable/icv-ciments>.
- Chen, 2009 : Une étude des bétons de construction par la méthode d'Analyse de Cycle de Vie. Thèse de l'Université Technologique de Troyes, 255 p.
- Chen, 2010 : Chen C., Habert G., Bouzidi Y., Jullien A., Ventura A., 2010. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An

- application to mineral additions in concrete. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 1231–1240
- CML, 2011: Goedkoop, 1995 : Goedkoop M.J.. «The Eco-Indicator 95: Description of the impact assessment methodology», NOH report 9514 A; PRé Consultants; Amersfoort (NL); July 1995. <http://www.pre.nl/eco-indicator95/eco-indicator95.htm>
- Ecoindicateurs 99. :Goedkoop MJ. Spriensma R. «The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment». Methodology report. Pré Consultants: B.V.;132 pp. 2001.
- Flower, 2007 : Flower D.J.M. and Sanjayan J.G., 2007. Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture. *Int J LCA* 12 (5) 282–288
- ISO 14044, 2006. Management environnemental - Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices. 49 p.
- Lee, 2005 : Lee K.-M., Park P.-J., 2005. Estimation of the environmental credit for the recycling of granulated blast furnace slag based on LCA. *Resources, Conservation and Recycling* 44, 139–151
- Sayagh, 2007, Shahinaz SAYAGH - **co-financée ADEME-LCPC**. Thèse de l'ENPC. Sujet : Approche multicritères du recyclage de matériaux alternatifs dans des chaussées. Thèse soutenue le 12 décembre 2007, 218p.
- Sayagh, 2010. Sayagh S., Ventura A., Hoang T., François D., Jullien A.,. Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures, *Resources Conservation and Recycling* , 2010, Vol. 54, pp. 348-358.

6 Auteurs et relecteurs

Auteurs	Véronique Lépicier (IFSTTAR)
Relecture d'experts	Agnès Jullien(IFSTTAR), Bogdan Muresan-Paslaru (IFSTTAR), Chantal Proust (Université d'Orléans)
Relecture bureau	Laurent Château (ADEME)
Date de mise en ligne, version finale	avril 2013