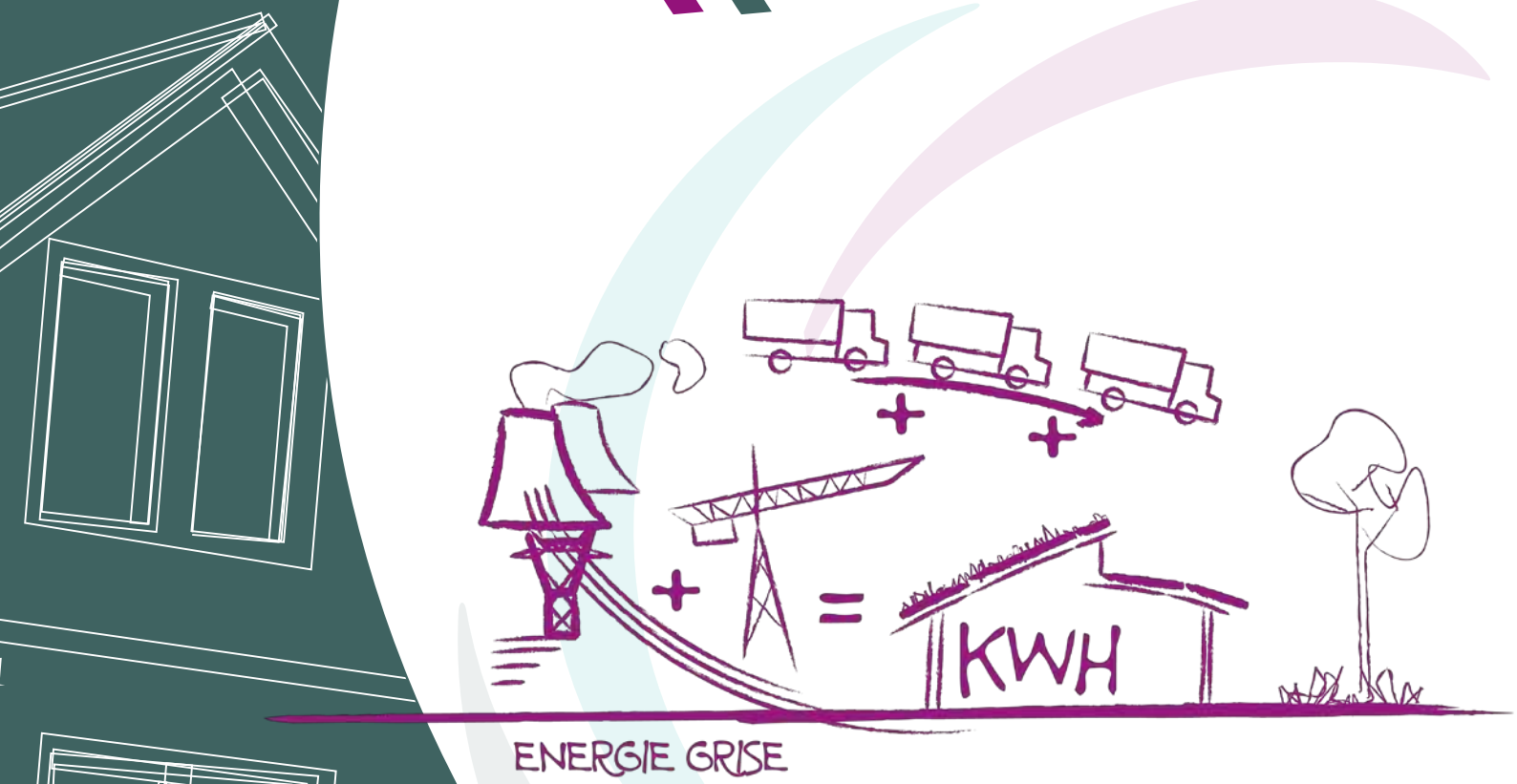
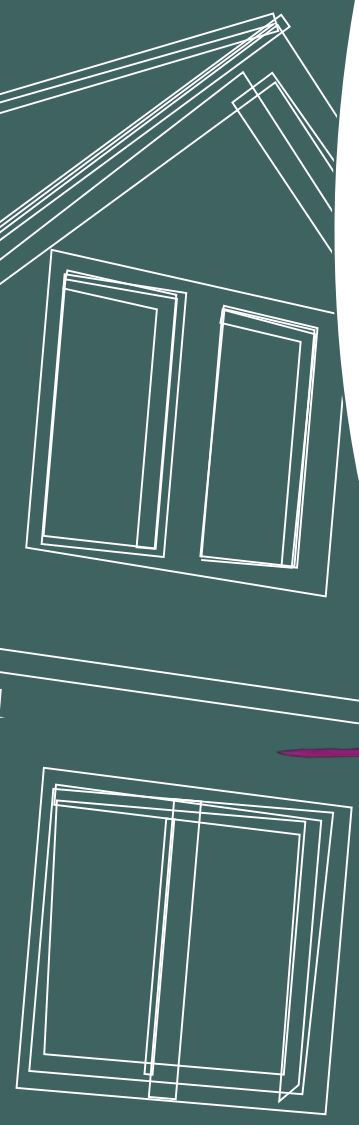
LES GUIDES BIO-TECH

L'énergie grise
des matériaux et des ouvrages





ARENE îledeFrance
Expertise et ressources pour un développement durable

ICEB

Pilotage : Pour l'ARENE Île-de-France : Dominique Sellier, pour l'ICEB : Christine Lecerf (Ailter)

Rédaction : ICEB : sous la coordination de Christine Lecerf (Ailter), avec la contribution de Xavier Talarmain (Symoé), Blandine Mathieu (Tribu), Emmanuelle Patte (Atelier Méandre), Serge Sidoroff (Pénicaud Green Building), Marie-Laure Stefani (Les ENR) et Nhat-Nam Tran (Le Sommer Environnement)

Contributions : Michel Le Sommer (Le Sommer Environnement) et Victor Jumez (Symoé)

Illustrations : Ivan Fouquet (atelier BAM)

Coordination éditoriale : Pascale Gorges, Pascale Céron, ARENE Île-de-France

Conception : Trait de Caractère(s)

Crédits photos : ARENE Île-de-France, ICEB

Date d'impression : Novembre 2012, imprimé sur du papier 100 % recyclé éco-label européen

Imprimeur : Caractère

ISBN EAN : 978-2-911-533-037

SOMMAIRE

LES POINTS CLÉS 06

1. ENJEUX ET CONTEXTE 11

2. DESCRIPTION DE LA THÉMATIQUE 12
2.1 - La méthode de travail mise en place pour l'élaboration du guide 12
2.2 - Ce que vous allez trouver dans ce guide 13
2.3 - Ce que vous n'allez pas trouver dans ce guide 13

3. LES ENJEUX DE L'ÉNERGIE 15
3.1 - Définitions des énergies 15
3.2 - Zoom sur le contenu énergétique de l'énergie 16
3.3 - Autres impacts de l'énergie 17

4. QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE GRISE ? 19
4.1 - Un peu d'histoire 19
4.2 - Les définitions existantes 21
4.3 - La définition de l'ICEB 31

5. OÙ SE CACHE L'ÉNERGIE GRISE DANS UN BÂTIMENT ? 37
5.1 - Exemples commentés des membres de l'ICEB 37
5.2 - Autres exemples significatifs 47
5.3 - Synthèse et ordres de grandeur 56

6. COMMENT QUANTIFIER L'ÉNERGIE GRISE ? 61
6.1 - Les bases de données 61
6.2 - Les outils de calcul 73

7. COMMENT RÉDUIRE L'ÉNERGIE GRISE ? 85
7.1 - Programmation 85
7.2 - Conception 88
7.3 - Réalisation 95
7.4 - Exploitation 97
7.5 - Fin de vie 97
7.6 - Deux exemples d'optimisation de l'énergie grise 99

8. COMMENT RÉDUIRE L'ÉNERGIE GRISE SANS NÉGLIGER LES AUTRES IMPACTS D'UN BÂTIMENT (psychologiques, culturels, esthétiques, sanitaires, sociaux, sensoriels, subjectifs, historiques...) ? 103

9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES 107
9.1 – Des outils et méthodes à développer et à s'approprier 107
9.2 – L'énergie grise dans les labels et la réglementation : ça commence ! 107
9.3 – Réfléchir sur l'énergie grise permet de changer le regard et d'optimiser les projets 108

10. ANNEXES 111
Annexe 1 – Facteur de conversion énergie primaire / énergie finale 111
Annexe 2 – Tableau synthétique des résultats des calculs d'énergie grise effectués par les membres du groupe de travail 118
Annexe 3 – Bases de données complémentaires 122
Annexe 4 – Outils de calcul complémentaires 125

11. BIBLIOGRAPHIE 127
11.1 – ICEB Café – Présentations PDF 127
11.2 – Ouvrages (Études / Rapports / Revues) 128
11.3 – Articles de revue 129
11.4 – Articles Internet 129
11.5 – Présentations 129
11.6 – Normes et réglementations françaises, européennes et internationales 130

Préface

Dans la série des guides « bio-tech » ARENE-ICEB, cette édition se distingue par sa thématique - l'énergie grise des matériaux et des ouvrages - relativement complexe et neuve. Le guide s'attache à la méthode de travail et suggère avant tout un questionnement suffisamment complet, susceptible de remettre en cause nos modes de conception classiques. En cela l'expertise portée par les membres de l'ICEB, et ainsi mise à disposition par ce guide, promeut la conception éco-responsable au cœur des projets de construction et d'aménagement.

Avec ce guide, pas de solutions toutes faites ou de répertoire de techniques innovantes mais des clés de lecture et de meilleure appréhension des enjeux et des méthodes de calcul existantes, appuyées sur une compilation et une analyse critique de retours d'expériences.

Ce qui est en jeu, au-delà de la connaissance et de la maîtrise des impacts environnementaux du cadre bâti, c'est l'émergence d'une filière professionnelle qui propose des outils d'aide à la conception et à l'évaluation.

Avec sa capacité d'échanges et de confrontation d'idées que l'ICEB a particulièrement mis en œuvre lors de ce groupe de travail sur l'énergie grise, la profession participe à la structuration des savoir-faire et trace le chemin des métiers d'avenir.

L'ARENE Île-de-France, dans cette perspective de structuration professionnelle, accompagne cette démarche d'innovation portée au plus proche des territoires et des projets par les acteurs du changement.

L'ICEB et l'ARENE Île-de-France s'engagent ici et avancent quelques indicateurs clés aux professionnels du secteur, avec pour prétention d'ouvrir le débat. À l'heure de l'affichage énergétique des bâtiments peu consommateurs, cet ouvrage démontre toute l'importance de la prise en compte du bilan global énergétique sur toute la durée de vie des ouvrages pour la filière du bâtiment durable.

Michel Le Sommer
Président de l'ICEB

Dominique Sellier
Directeur du pôle prospective et transition écologique
ARENE Île-de-France

Les points clés du guide

Maintenant que l'on sait, au moins sur le papier, réaliser des bâtiments faiblement consommateurs d'énergie, la consommation d'énergie liée à la construction, puis à la déconstruction de ces bâtiments prend une part de plus en plus importante dans le bilan global énergétique sur toute la durée de vie. Il devient donc nécessaire de diminuer aussi cette consommation, à la fois pour diminuer les consommations globales, mais aussi pour diminuer les consommations actuelles (la part la plus importante est celle de la phase de construction au moment où la lutte contre le changement climatique impose de faire le plus d'efforts possibles).

Pour aborder ce sujet, nous avons d'abord commencé par définir de manière très précise ce qu'était l'énergie grise par l'analyse de normes, réglementations, études et publications. Puis, à partir de calculs effectués en interne et d'analyses d'études publiées ces dernières années en France et à l'international, nous avons identifié des ordres de grandeur d'énergie grise afin de pouvoir les comparer aux consommations d'énergie en exploitation, créer des points de repère et identifier les poids relatifs des choix constructifs. Nous avons ensuite inventorié et analysé les outils permettant de calculer l'énergie grise, à savoir les bases de données sur les matériaux et les logiciels de calcul, de manière à identifier les outils les plus pertinents. Enfin, comme ce guide se veut un outil d'aide à la conception, nous avons identifié les pistes de réduction de l'énergie grise à chaque phase d'un projet.

Voici la synthèse de ces principaux éléments.

Définitions de l'énergie grise proposées par l'ICEB

> **L'énergie grise d'un matériau, équipement ou service est constituée de deux énergies grises :**

- l'énergie grise non renouvelable : énergie procédé (apport d'énergie nécessaire dans les processus mis en œuvre pendant le cycle de vie) d'origine non renouvelable,
- et l'énergie grise renouvelable : énergie procédé d'origine renouvelable,
- sur toute la durée du cycle de vie hors vie en œuvre.

> **L'énergie grise d'un bâtiment est la somme des énergies grises des matériaux et équipements qui le composent** à laquelle on ajoute :

- l'énergie nécessaire au déplacement de ses matériaux et équipements entre l'usine et le chantier,
- la consommation d'énergie du chantier complémentaire à celle déjà intégrée dans l'énergie grise des composants et équipements (base vie, énergie de mise en œuvre, transport des personnes),
- les énergies grises liées au renouvellement des matériaux et équipements qui ont une durée de vie inférieure à celle du bâtiment,
- l'énergie nécessaire à la déconstruction de l'ouvrage.

Elle ne comprend pas l'entretien (nettoyage et petites réparations).

Pour schématiser, l'énergie procédé est l'énergie « perdue », c'est la dette énergétique, alors que l'énergie matière est du stock d'énergie, mobilisé de manière temporaire.

L'énergie matière peut être récupérable en fin de vie, soit par le réemploi, soit par la valorisation matière, soit par la valorisation énergétique.

Quelques repères d'ordre de grandeur de l'énergie grise

> Ordres de grandeur sur l'ensemble des bâtiments :
  - énergie grise sur toute la durée de vie = de 1 500 à 3 500 kWh/m²$_{SHON}$,
  - énergie grise ramenée à l'année = de 20 à 75 kWh/m²$_{SHON}$.an ;

> Ordres de grandeur pour des bâtiments optimisés :
  - énergie grise sur toute la durée de vie = de 1 200 à 2 200 kWh/m²$_{SHON}$,
  - énergie grise ramenée à l'année = de 20 à 30 kWh/m²$_{SHON}$.an ;

> Équivalent énergie grise en années de consommations d'énergies pour l'exploitation d'un bâtiment BBC 2005 = de 30 à 50 ans.

> Le surinvestissement en énergie grise pour diminuer les consommations en énergie de la phase exploitation est négligeable par rapport aux gains en consommation d'énergie sur la durée de vie du bâtiment (temps de retour sur investissement énergétique de l'ordre de l'année pour une construction neuve).

> Une réhabilitation est bien moins consommatrice en énergie grise qu'une construction neuve. Pour espérer obtenir un bilan total énergie grise + énergie exploitation plus faible en construction neuve qu'en réhabilitation, il faut optimiser fortement le niveau énergétique en phase exploitation du bâtiment neuf (niveau passif voire positif).

Quels outils utiliser pour calculer l'énergie grise ?

> Deux grandes familles de bases de données sur les impacts environnementaux des produits se distinguent :
  - la base de données française INIES avec les Fiches de Données Environnementales et Sanitaires, FDES qui vont, avec la nouvelle norme européenne, être remplacées par les EPD, Environnemental Product Declaration,
  - la base de données suisse, Éco-bilans dans la construction de KBOB, basée sur la base de données suisse Ecoinvent ;

> Atouts/inconvénients de ces deux bases de données :
  - La base INIES ne permet pas d'extraire la valeur de l'énergie grise selon la définition de l'ICEB (énergie procédé totale uniquement), mais les futures EPD le permettront,
  - La base KBOB permet d'extraire la valeur de l'énergie grise selon la définition de l'ICEB,
  - INIES donne des valeurs par unité fonctionnelle, KBOB par composant de base,
  - INIES fait le calcul sur l'ensemble du cycle de vie y compris entretien et maintenance, KBOB uniquement sur fabrication et fin de vie,
  - INIES est moins complète que KBOB,
  - les données des FDES ne sont pas systématiquement vérifiées par une tierce partie, les données de KBOB sont issues d'Ecoinvent qui sont vérifiées,
  - le mix énergétique d'INIES est celui de la France, celui de KBOB de la Suisse ;

> Le choix d'une base de données s'effectue en fonction du stade du projet et du type d'outil utilisé. Il est surtout important pour faire des comparaisons, soit d'utiliser des données issues d'une même base, soit de bases différentes mais avec des calculs intermédiaires pour avoir des valeurs d'énergie correspondant à la même définition.

> Pour calculer l'énergie grise d'un bâtiment, il existe des outils et logiciels. On en distingue deux types :

- les outils utilisant une seule base de données : généralement Ecoinvent ou KBOB basée sur Ecoinvent,
- les outils utilisant plusieurs bases de données : par exemple les outils ayant fait le choix de la base de données INIES. Celle-ci ne comportant pas assez de composants ou matériaux est complétée par des données fabricants, les EPD, les PEP, Ecoinvent, des calculs internes…

> Le choix d'un logiciel est lié à :

- la phase d'étude du projet. En phase esquisse par exemple, l'outil doit être simple et peu consommateur de temps. La précision n'est pas recherchée mais uniquement les ordres de grandeur,
- la possibilité de modéliser et comparer simplement plusieurs variantes,
- la lisibilité et la pédagogie de la présentation des résultats,
- la transparence sur les sources des données et la possibilité d'intégrer des produits nouveaux,
- la facilité de prise en main et le coût.

Enfin, à ce stade de maturité du sujet de l'énergie grise, l'important est aujourd'hui, plus que d'avoir des calculs très précis, de permettre aux acteurs d'un projet de se poser les questions les plus pertinentes et de faire des choix judicieux sans idées préconçues.

Quelles pistes pour minimiser l'énergie grise ?

> Programmation :

- en programmation urbaine, travailler la densité pour limiter l'étalement urbain, en créant un véritable cadre de vie avec une mixité fonctionnelle et sociale et des « respirations » pour les activités récréatives afin d'éviter de générer des transports supplémentaires des habitants pour « s'évader »,
- en programmation architecturale, favoriser la mixité fonctionnelle, la mutualisation des usages, optimiser les surfaces et volumes par rapport aux usages et à la qualité des espaces, limiter le nombre de places de parking, se poser la question de la réhabilitation plutôt que de la construction neuve, réfléchir à l'adaptabilité du bâtiment ;

> Conception :

- prendre le temps de la réflexion. Faire une architecture de qualité, belle pour qu'on s'y sente bien et qu'on ait envie de la conserver et durable par ses matériaux et sa robustesse,
- limiter la quantité de matériaux à mettre en œuvre par une efficacité du plan, de la forme, des principes constructifs permettant des évolutions des usages, des choix esthétiques,
- choisir des matériaux à faible énergie grise : comparer des matériaux avec les bases de données, utiliser des matériaux fabriqués à partir de matières premières recyclées, des matériaux biosourcés, des matériaux locaux, faire du réemploi,

- choisir des principes de mise en œuvre à faible énergie grise : préfabriquer, calepiner en fonction des surfaces et des produits, choisir des principes de pose permettant la séparabilité des matériaux en fin de vie ;

> Réalisation :

- être attentif à la consommation d'énergie sur le chantier, dans une démarche globale de chantier à faibles nuisances,
- convaincre le maître d'ouvrage de l'intérêt de se donner et de donner le temps de bien faire pour éviter les malfaçons et les reprise,
- utiliser les accidents de fabrication comme source d'inspiration plutôt que de tout faire refaire ;

> Exploitation :

- le choix et la mise en œuvre des matériaux et équipements de remplacement des éléments en fin de vie ou dégradés doivent être effectués avec le même soin et les mêmes exigences en énergie grise que ceux des éléments d'origine,
- sensibiliser le maître d'ouvrage et les usagers et rechercher avec eux des solutions de type « rustine » esthétiquement acceptables pour éviter par exemple de devoir refaire à neuf tout un revêtement ;

> Fin de vie :

- faire un diagnostic déchets avant la démolition et rechercher des solutions de valorisation matière pour un maximum de déchets, soit sur place, soit dans des filières appropriées avec le moins de transformation possible.

La démarche d'optimisation de l'énergie grise est un outil complémentaire d'aide à la décision qui contribue à faire évoluer nos métiers. Elle dépasse largement les simples calculs pour poser des questions de société, d'usage, de durée de vie, de qualité de l'architecture, de confort, de patrimoine, de culture, de territoire, de savoir-faire, d'esthétique… Comme la démarche de réduction des consommations d'énergie en exploitation et plus largement des impacts environnementaux du bâtiment, la prise en compte de l'énergie grise change notre regard sur les projets et nous conduit à nous reposer des questions fondamentales.

Pôle œunotouristique de Saint-Christol - Architecte mandataire : Philippe Madec.
BE Développement durable : TRIBU. Photo : TRIBU

1. Enjeux et contexte

L'énergie grise est une problématique émergente. L'ICEB s'en est emparée pour éclaircir la question et commencer à apporter des éléments de réflexion et d'aide à la conception.

Un effort a été entrepris à l'échelle planétaire pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et, par conséquent les consommations d'énergie. Dans un souci d'efficacité, le travail a commencé par les secteurs les plus consommateurs d'énergie. Le bâtiment est le premier secteur consommateur d'énergie en France, avant le transport et l'industrie. Et le second secteur émetteur de gaz à effet de serre. La priorité a d'abord été de diminuer les consommations des bâtiments en phase exploitation.

On sait aujourd'hui construire des bâtiments très économes en énergie, confortables et sains. En ajoutant des systèmes de production d'énergie intégrés, la réalisation de bâtiments à énergie positive qui produisent plus qu'ils ne consomment est possible. Cela reste à généraliser dans la construction neuve mais aussi sur le parc existant.

Cependant, les consommations nécessaires à la fabrication, à l'entretien, à la maintenance, à l'adaptation et à la déconstruction des bâtiments qui paraissaient proportionnellement négligeables deviennent maintenant très importantes. D'où la nécessité aujourd'hui de se pencher sur cette question et de voir où et comment il est souhaitable d'agir. C'est l'objet de ce guide sur l'énergie grise des matériaux et des ouvrages.

Il porte sur tous les types d'ouvrages et s'élargit aussi à la question de l'aménagement urbain et paysager.

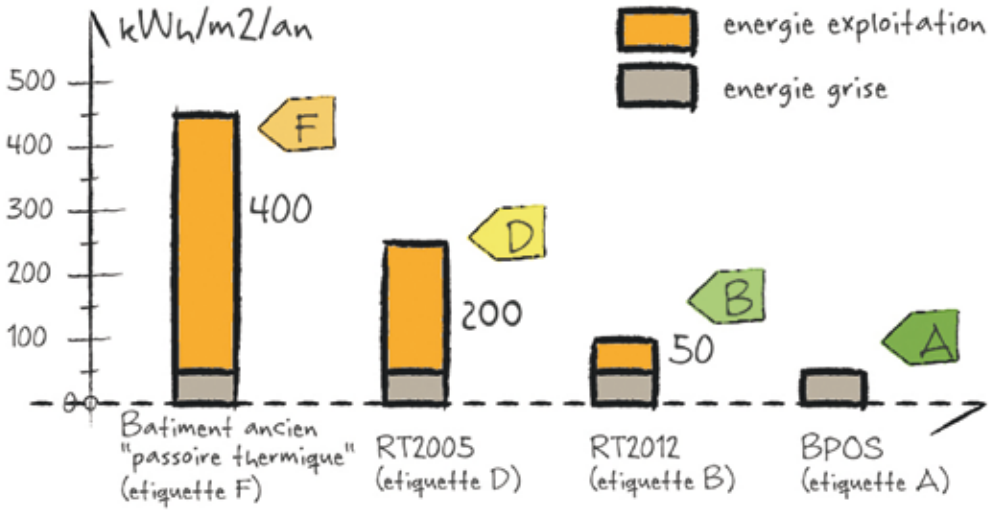


Figure 1 - Évolution de la proportion entre énergie grise et énergie d'exploitation du bâtiment - Source GT ICEB

2. Description de la thématique

2.1 – La méthode de travail mise en place pour l'élaboration du guide

Se poser des questions du point de vue de l'éco-concepteur et apporter des réponses avec une approche à la fois rigoureuse, technique et sensible :

> tout d'abord, nous avons commencé par mettre sur la table l'ensemble des questions que nous nous posons dans notre pratique et auxquelles nous avions envie que ce guide réponde. Comme vous allez le découvrir ce guide mêle à la fois des réponses et approches techniques comme des approches plus larges : économiques, sociales, esthétiques, patrimoniales, sensibles… ;

> ensuite, nous nous sommes limités à l'énergie grise et n'avons pas traité les autres impacts même si la question des émissions de gaz à effet de serre a fait l'objet d'un débat important au sein du groupe ;

> pour trouver les réponses à nos questions, nous avons travaillé à partir des données suivantes :

- les ICEB cafés : 6 ont abordé le sujet de manière directe ou connexe depuis 2008,
- des opérations réalisées par les membres du groupe de travail sur lesquelles des calculs d'énergie grise ont été effectués,
- des publications, présentations, rapports sur le sujet présentant des résultats de calculs, des comparaisons d'outils ou de bases de données, des démarches. Les documents analysés sont français, européens et internationaux,
- des ouvrages plus généraux,
- les normes et réglementations françaises et suisses ;

> En complément de l'analyse de ces sources, nous avons aussi effectué nos propres calculs, comparaisons et synthèses afin de mettre en évidence les points clés en réponse à nos interrogations ;

> toutes nos questions n'ont pas trouvé de réponse mais, toutes ont au moins fait l'objet d'un travail de formalisation.

Une co-élaboration du guide :

> la démarche d'élaboration de ce guide est en cohérence avec les valeurs qui nous animent. Nous avons travaillé en co-élaboration ;

> notre objectif a été de refléter l'ensemble des points de vue des membres du groupe de travail même si un parti pris devait se dégager au nom de l'ICEB. Les débats ont ainsi été intenses et cela nous a permis d'avancer ensemble ;

> pour l'écriture du document, nous nous sommes réparti les tâches, d'où des différences de style qui n'affectent pas la cohérence de fond ;

> le travail sur ce guide a aussi été une façon de nous former et de faire évoluer nos pratiques, ce qui est un retour valorisant pour les membres ayant travaillé quasiment bénévolement ;

> enfin, la méthode utilisée et les personnalités des intervenants ont fait que le travail s'est déroulé dans un plaisir d'échange et de partage.

2.2 – Ce que vous allez trouver dans ce guide

> Des définitions claires ;

> Des ordres de grandeur d'énergie grise pour les ouvrages et les lots qui les composent ;

> Une photographie des connaissances actuelles sur le sujet y compris les réglementations et normes ;

> Une analyse et des recommandations sur les principales bases de données et les principaux outils de calculs ;

> Des exemples de calculs et les conclusions qu'on peut en tirer ;

> Des pistes de solutions pour diminuer l'énergie grise qui vont bien au-delà des simples réponses techniques et élargissent le sujet aux questions patrimoniales, culturelles, esthétiques, économiques, sociales…

2.3 – Ce que vous n'allez pas trouver dans ce guide

> Une doctrine ;

> Des solutions toutes faites ;

> Une liste de matériaux « verts » ;

> Des méthodes de compensation.

Bonne lecture !

Maison des associations diocésaines - Architecte : Méandre. Photo : Luc Boegly

3. Les enjeux de l'énergie

Le concept moderne d'énergie apparaît au XIX^{e} siècle avec l'invention de la machine à vapeur par James Watt qui a donné son nom à l'unité de mesure du flux énergétique ou puissance. L'énergie désigne alors les caractéristiques que possède un système capable de produire du travail.

L'énergie permet de chauffer, de fabriquer, de transporter.

En démultipliant l'activité de l'homme, elle est une des composantes majeures de la révolution industrielle et a pu faire croire à l'homme qu'il pouvait maîtriser la nature.

Par la puissance qu'elle confère, l'énergie représente un enjeu économique, social, géographique à l'échelle planétaire. Il n'est donc pas étonnant qu'elle soit l'objet de concurrence commerciale et de conflits militaires. Cette situation va s'aggraver avec les bouleversements climatiques et la raréfaction des ressources, et cette aggravation touchera particulièrement les plus démunis.

3.1 – Définitions des énergies

On distingue :

> **L'énergie primaire :** c'est l'énergie qui n'a été soumise à aucun processus de conversion ou de transformation (définition de la norme EN 15 603). Il s'agit des énergies directement puisées dans les réserves naturelles telles que le gaz naturel, le pétrole, le charbon, le minerai d'uranium, la biomasse, l'énergie hydraulique, le soleil, le vent, la géothermie (norme NF P01-010) ;

> **L'énergie finale :** c'est l'énergie livrée au consommateur pour sa consommation finale (essence à la pompe, électricité au foyer...). Elle comprend, outre l'énergie primaire, l'énergie nécessaire à l'extraction de l'énergie primaire, son transport jusqu'au lieu de transformation, sa transformation et son transport jusqu'au lieu d'utilisation. Il faut de l'énergie pour fabriquer de l'énergie. C'est l'énergie « grise » de l'énergie ;

> **Les énergies de stock :** elles existent dans la nature en quantité finie et disparaissent une fois la réserve épuisée. Ce sont les ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz) et fissiles (uranium). L'énergie géothermique est parfois considérée comme une énergie de stock mais avec une durée de vie très longue ;

> **Les énergies de flux ou renouvelables :**

- selon la norme ISO 21930 (Bâtiments et ouvrages construits - Développement durable dans la construction - Déclaration environnementale des produits de construction de 2007), l'énergie renouvelable est une ressource cultivée, naturellement renouvelable ou naturellement remplacée sur une échelle de temps humaine. Exemples : solaire, éolien, bois,
- selon l'INSEE : « Les énergies renouvelables incluent l'énergie d'origine solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, ainsi que le bois de chauffage, les résidus de récolte, les biogaz, les biocarburants, les déchets urbains ou industriels et les pompes à chaleur ».

3.2 – Zoom sur le contenu énergétique de l'énergie

Pour obtenir une énergie utilisable par un utilisateur final (un bâtiment par exemple), il faut réaliser un certain nombre d'opérations qui elles-mêmes consomment de l'énergie. Par exemple :

> la construction des centrales, des éoliennes, des panneaux solaires ;

> le raffinage ;

> la production d'électricité avec le rendement du système ;

> le transport de l'électricité avec les pertes en ligne.

> pour le bois, la coupe des arbres, leur transformation en buches, granulés, le transport de ces produits finis…

La différence entre l'énergie finale livrée au consommateur et l'énergie initiale plus l'énergie dépensée en transformation et transport s'exprime par le facteur d'énergie primaire, PEF, égal à l'énergie primaire divisée par l'énergie finale.

Plusieurs approches existent pour calculer ce coefficient. Elles sont détaillées dans l'annexe A. Elles varient en fonction du périmètre, du mix énergétique de l'électricité, des conventions réglementaires, du pays.

> Le tableau suivant est une synthèse des résultats de ces différentes approches, auxquelles ont été ajoutées les valeurs utilisées par le bureau d'études TRIBU :

Facteurs d'énergie primaire (PEF)	RT France 2005 et 2012	Global Chance France 2007	Energy Star USA 2011	NF EN 15603 1996 (c)		CENERG France (2007) (d)	TRIBU France 2011
				PEF total	PEF non renouvelable		
Electricité délivrée au site par le réseau	2,58	3,17	3,34	3,31 (b)	3,14 (b)	3,23	3,24
Gaz naturel fourni au site	1		1,047	1,36	1,36	1,25	1,1
Bois-énergie et biomasse combustible livrée sur le site	1 / 0,6 (a)		1	1,06 à 1,10	0,06 à 0,10	1,5	0,2 (non renouvelable)
Biomasse liquide (HVP) ou gazeuse (biogaz)	1		1				0,3 (non renouvelable)
Electricité photovoltaïque produite sur site et revendue au réseau	2,58		3,34				3,2
Electricité photovoltaïque produite et consommée sur le site	2,58		1			0,25	0
Chaleur produite par des capteurs solaires thermiques et consommée sur le site	1		1				0
Energie prise sur l'environnement (sol, air, eau)	1		1				0

(a) 0,6 pour le label BBC 2005
(b) pour le « mix » électrique UCPTE (Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité)
(c) sur la base des données d'ETHZ 1996
(d) sur la base des données d'Ecoinvent 2007

À ce constat, on peut ajouter une réflexion sur la mobilisation de la ressource renouvelable. Pour l'éolien ou l'hydroélectricité, la puissance disponible est limitée sur un même flux et consommer cette énergie réduit la quantité disponible pour d'autres usages. En revanche, poser un panneau photovoltaïque sur un toit ou une façade n'empêche pas les autres d'en faire autant donc cela ne réduit pas la ressource pour les autres.

3.3 – Autres impacts de l'énergie

Épuisement des ressources

On a aujourd'hui conscience de la limite des réserves en pétrole, en gaz et en charbon. Cependant, à mesure qu'on les utilise, et à cause du coût croissant de ces ressources, on découvre de nouveaux gisements, plus difficile à atteindre. On améliore les techniques de forage, de raffinage, etc. mais cela a un coût environnemental, humain, financier, énergétique et d'émission de gaz à effet de serre de plus en plus important.

Émission de gaz à effet de serre

La combustion d'énergie fossile est la première activité humaine responsable de l'émission de gaz à effet de serre. Cela représente, selon l'Agence Internationale de l'Énergie, 29 381 millions de tonnes de CO_2 en 2008.

Le schéma ci-après montre les émissions de gaz à effet de serre par kWh d'énergie finale pour plusieurs énergies.

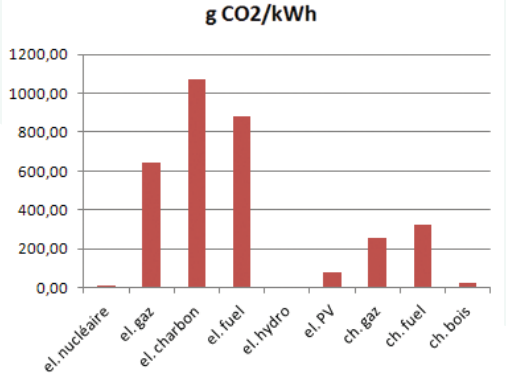


Figure 2 : Émissions de gaz à effet de serre en équivalent CO_2 par kWh d'énergie finale pour différentes énergies – Source : Bruno Peuportier, Centre Énergétique et Procédés, MINES ParisTech

Impact sur les paysages et les écosystèmes

- Pour les énergies fossiles, il s'accroît à mesure que l'on cherche à atteindre des gisements fossiles de plus en plus inaccessibles : marées noires, destruction des sites, pollution par les techniques d'investigation ou de collecte (gaz de schiste), transport passage des pipe-lines ;
- pour les énergies renouvelables, il y a aussi un impact des installations : transformation des paysages, des écosystèmes et des populations locales pour les barrages hydrauliques, transformation des paysages pour les éoliennes et le photovoltaïque à grande échelle ;
- le transport de l'énergie produite de manière centralisée (lignes haute tension aériennes) transforme le paysage.

Impact sur la santé et la sécurité

- Production de déchets nucléaires concentrés et diffus, rejets gazeux et liquides, notamment lors du retraitement ;
- risques pour le vivant et l'homme dus aux radiations « normales » et accidentelles ;
- champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence émis par les lignes haute tension et les transformateurs.

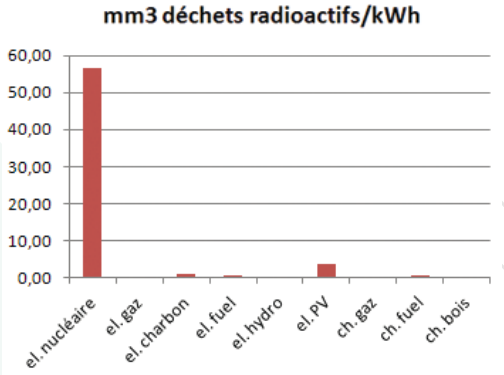


Figure 3 : Équivalences en déchets radioactifs par kWh final pour différentes énergies – Source : Bruno Peuportier, Centre Énergétique et Procédés MINES ParisTech

L'énergie avec le meilleur bilan environnemental est celle que l'on ne consomme pas (negaWatt).

ECO HOTEL SPA « La Grée des Landes », Cournon. Architecte : Hubert Pénicaud. Photo : © J.N. Reichel

4. Qu'est-ce que l'énergie grise ?

Le terme « grise » indique que cette énergie ne se voit pas, même si elle existe bien dans la construction. Le terme anglais, « embodied energy », exprime plus clairement cette notion d'énergie incluse dans le matériau.

Pour mieux comprendre, on peut faire l'analogie avec la littérature grise. Selon l'Association Française de NORmalisation (AFNOR), la littérature grise représente « tout document dactylographié ou imprimé, produit à l'intention d'un public restreint, en dehors des circuits commerciaux de l'édition et de la diffusion et en marge des dispositifs de contrôle bibliographiques ». **La littérature grise ou l'énergie grise font donc partie intégrante de l'œuvre ou de la construction mais ne se voient pas.**

4.1 – Un peu d'histoire

A la fin des années 60 – début 70, des scientifiques américains (U.S. Environmental Protection Agency) s'intéressent de près à l'épuisement rapide des combustibles fossiles et développent le Resource and Environmental Profile Analysis, REPA. Ils mènent des études pour comprendre les impacts sur l'environnement des processus de fabrication des produits et de l'activité au sein de l'entreprise, à l'échelle de l'industrie.

La première entreprise à mener ce type de recherches est la société Coca-Cola® basée à Atlanta (États-Unis) en 1969. Elle demande au Midwest Research Institute d'analyser les impacts environnementaux de la fabrication de la fameuse bouteille de Coca-Cola®[1]. Cette première Analyse de Cycle de Vie permet de déterminer :

- la part de consommation d'énergie nécessaire à son processus de fabrication ;
- la disponibilité effective des matières premières ;
- les coûts engendrés ;
- le type de bouteille à privilégier : verre ou plastique, recyclable ou non ;
- le lieu de fabrication.

Le choix de Coca-Cola® s'est finalement porté sur la bouteille en plastique plutôt qu'en verre. Jusqu'à quel point l'aspect environnemental a-t-il impacté le choix ?

En 1972, au Royaume-Uni, Ian Boustead s'intéresse de près à l'énergie totale utilisée dans la fabrication des emballages de boissons en verre, plastique, acier et aluminium. Par la suite, il consolide sa méthodologie pour la rendre applicable à une plus grande variété de produits et en 1979, il publie le *Handbook of Industrial Energy Analysis* (Manuel d'Analyse d'Énergie Industrielle).

1 - http://www.lcacenter.org/Data/Sites/1/SharedFiles/History/Environmental%20Impacts%20of%20Coca-Cola%20Beverage%20Containers%20Vol%201.pdf

En 1973, le monde connaît sa première crise pétrolière. Entre 1970 et 1975, l'US EPA améliore la « Resource and Environmental Profile Analysis » et développe un processus de suivi pour conduire des études d'Analyse de Cycle de Vie des matériaux. Cependant les progrès sont lents et il faudra attendre le milieu des années 80, voire le début des années 90, pour percevoir un réel engouement pour la démarche d'ACV.

En 1984, l'Empa, laboratoire fédéral suisse d'essai et de recherche sur les matériaux, publie avec le soutien de l'OFEFP (Office Fédéral Suisse de la Forêt, de l'Environnement et des Paysages) un premier rapport concernant l'écobilan des matériaux d'emballages. Dans les années qui suivent, cette réflexion s'étend à d'autres produits tels que les matériaux de construction.

En 1992, l'outil d'Analyse de Cycle de Vie est présenté officiellement pendant le Sommet de la Terre à Rio.

En 1993, Sustainability Ltd, les associations SPOLD (Society for the Promotion Of Life cycle Development) et « Business in the Environment » publient The *LCA Sourcebook* - a European business guide to Life Cycle Assessment - inventaire international des concepts, outils, compétences et bibliographie sur les ACV.

Vers le milieu des années 90, l'Empa développe le logiciel EcoPro destiné aux spécialistes de la construction, pour la comparaison des produits et des technologies de substitution, tandis que d'autres logiciels généralistes apparaissent : aux Pays-Bas, SimaTool développé à Leiden par CML et SimaPro développé par PréConsultancy, en Suède à Göteborg, LCA-Tool développé par Chalmers Industriteknik et EcoLab, enfin en France, la base de données Deam et le logiciel Team développé par la société Ecobilan grâce au soutien de l'ADEME et du Ministère de l'Environnement.

Les premières normes internationales traitant des différentes étapes de méthode d'ACV voient le jour à la fin des années 90 : ISO 14040, 41, 42, 43, 44 dont seules subsistent aujourd'hui les normes ISO 14040 et 14044 (les normes ISO 14041, 42 et 43 ont été regroupées dans la norme ISO 14040).

À la même époque, la Commission Européenne finance plusieurs projets sur les ACV et crée un réseau de compétences européen, LCAN, tandis que la SETAC (Society for Environmental Toxicology & Chemistry) organise des congrès internationaux annuels sur les ACV, et que Walter Klöpffer publie en Allemagne *The International Journal of LCA* (diffusé par Springer), la première revue internationale qui reste aujourd'hui la revue de référence sur les ACV.

En 1996, l'École Polytechnique Fédérale de Zürich (EPFZ) élabore une base de données d'inventaires de cycle de vie sur les systèmes énergétiques suisses et européens qui, bien que documentée en allemand, devient rapidement une référence internationale. En 1998, après la dispersion de l'équipe qui a réalisé ce travail remarquable, un de ses membres, Rolf Frischknecht, prend la tête du « Centre suisse pour les inventaires de cycle de vie écologiques », en abrégé Centre Ecoinvent, qu'il dirigera pendant 10 ans avant de passer la main en 2008 à Bo Weidema. Ce centre, une initiative commune de l'EPFZ, de l'EPFL (Lausanne), de l'Empa, de l'Institut Paul Scherrer et de l'Agroscope Tänikon-Reckenholz, met à jour et diffuse une version actualisée et complétée de la base de données initiale de l'ETHZ . Une version 2, remise à jour et enrichie, voit le jour entre 2005 et 2008. Aujourd'hui, cette base de données offre 4000 fichiers de données à plus de 1200 clients de plus de 40 pays.

La thématique d'Analyse de Cycle de Vie et l'intérêt porté sur la part de l'énergie dans le processus de fabrication restent des sujets « jeunes » dont l'exploration ne fait que commencer…

4.2 – Les définitions existantes

Les consommations d'énergie se calculent sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un bâtiment. L'énergie grise est une partie de la consommation d'énergie sur ce cycle de vie d'où l'intérêt d'appréhender les notions de cycle de vie, durée de vie, périmètre d'étude et démarche d'ACV - Analyse du Cycle de Vie.

Le cycle de vie

La norme NF P01-010 divise le cycle de vie d'un produit de construction en 5 étapes :

1. la production comprend la fabrication du produit mais aussi l'extraction, la préparation et le transport des matières premières nécessaires à la fabrication du produit, cette étape s'arrête à la sortie du produit de l'usine ;
2. le transport comprend l'acheminement du produit de l'usine de production jusqu'au chantier où il sera utilisé ;
3. la mise en œuvre consiste en la mise en place du produit dans un ouvrage. Le transport des déchets de mise en œuvre (chutes de découpe, consommables…) est également pris en compte ;
4. la vie en œuvre pendant laquelle le produit assure sa fonction dans le bâtiment. Durant la vie en œuvre, le produit peut faire l'objet d'entretien, de maintenance, de remplacement partiel pris en compte dans le bilan environnemental. Cette étape couvre toute la durée de vie typique du produit (DVT) ;
5. la fin de vie consiste en la dépose du produit lors d'une opération de démolition, réhabilitation ou entretien. Le transport des déchets liés à cette étape jusqu'à un site de valorisation ou d'élimination est pris en compte.

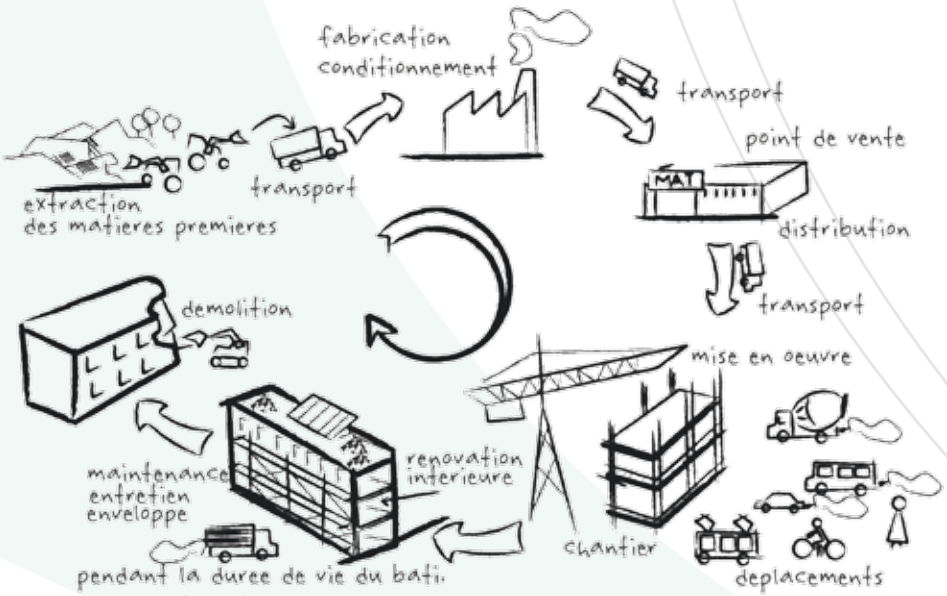


Figure 4 - Schéma du cycle de vie d'un bâtiment - Source GT ICEB

Cette définition prend en compte les opérations d'entretien, maintenance et remplacement partiel, mais pas les déplacements des personnels des usines de fabrication, ni le traitement des déchets une fois arrivés dans le centre de traitement.

La durée de vie

Plusieurs définitions peuvent être utilisées pour la durée de vie :

- la base de données INIES définit dans son lexique la durée de vie typique ou DVT comme « une estimation de durée de vie faite par le fabricant à partir de valeurs d'usage. Elle correspond à la durée de vie du produit pour un usage normal et avec un entretien normal. Elle est découplée de tout système de garantie même si la valeur doit être justifiée par le fabricant. Cette valeur intègre l'entretien et d'éventuelles réparations du produit » ;
- le bilan Carbone® utilise comme durée de vie, la durée d'amortissement comptable qui correspond, de manière générale, à la période au bout de laquelle le produit, l'aménagement ou l'équipement est statistiquement remplacé.

Dans tous les cas, ce qui en ressort est la durée de vie associée à l'usage. La durée de vie réelle dépend beaucoup plus de l'utilisation du bâtiment et du contexte que d'une durabilité physique intrinsèque :

- changement de locataire ou de propriétaire qui souhaite refaire tout l'aménagement intérieur à son image ;
- détérioration d'un store extérieur arraché par le vent et qui nécessite d'être remplacé plus vite que prévu ;
- dégradation par les usagers…

Par exemple, un revêtement de sol en linoléum mis en œuvre dans une école (Bâtiment d'une durée de vie supérieure à 50 ans) aura sans doute une durée de vie conforme à sa durée de vie typique (de 15 à 25 ans). En revanche, le même revêtement de sol mis en œuvre dans un aménagement de point de vente aura au maximum la durée de vie de l'aménagement (en moyenne de 5 à 7 ans).

Ainsi, la Durée de Vie Typique des matériaux, issue des FDES, ne correspond pas à leur durée de vie réelle. Voici tout de même quelques exemples de durée de vie typique, puisqu'ils seront utilisés dans les calculs d'énergie grise :

Exemples de durées de vie typique, issues des FDES :

Lot	Matériaux	Durée de vie typique, DVT
Structure	Terre cuite : brique	150 ans
	Zinc : couverture	100 ans
	Bloc béton aggloméré	100 ans
	Bois en lamellé-collé	100 ans
	Charpente en bois de type chêne et résineux	100 ans
	Parpaing avec isolant intégré	50 ans
	Résine de scellement (-> fer à béton)	50 ans
Façade	Terre cuite : carreaux, brise-soleil	100 ans
	Fibres-ciment en panneaux	60 ans
	Acier : simple peau, plateau de bardage	50 ans
	Mortier enduit minéral	50 ans
Menuiseries extérieures	Aluminium, PVC ou bois	30 ans
Aménagements intérieurs	Pierre : revêtement de sol	150 ans
	Grès cérame : carrelage	50 ans
	Plaques de plâtre : BA15, BA13	50 ans
	Peinture	30 ans
	Linoléum : sol souple	15/25 ans
	Moquette	8/15 ans
Faux plafonds / Isolation thermique	Laine minérale	50 ans
	Laine de bois + laine de roche + fibres de bois enrobées de ciment blanc	50 ans
	Laine de bois + polystyrène expansé	50 ans
	Laine de verre	50 ans
	Laine de roche	50 ans
	Plaque de plâtre	50 ans
	polyuréthane	50 ans
Étanchéités	Isolant thermique (+ étanchéité) en verre cellulaire	100 ans
	Couche drainante en polystyrène expansé pour toitures terrasses	50 ans
	Étanchéité toiture en bitume-polymère utilisée en jardins ou sous protection dure	40 ans
	Étanchéité toiture en bitume-polymère (suivant si réfections ou non)	30/90 ans
Plomberie	Tube de canalisation en cuivre	100 ans
	Tube de canalisation en fonte	100 ans
	Tube de canalisation en PVC	50 ans
Aménagements extérieurs	Revêtement en dalles de caoutchouc (aire de jeux)	15 ans

Pour un bâtiment, la durée de vie est à déterminer avec le maître d'ouvrage en fonction de l'usage et des modalités de gestion du patrimoine.

L'analyse du cycle de vie

L'Analyse du Cycle de Vie, ACV (Life Cycle Assessment, LCA, en anglais) d'un produit ou d'une activité humaine consiste à identifier son empreinte environnementale, en quatre étapes, selon la norme internationale ISO 14 :

- la définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- le recueil des données d'inventaire : quantification des ressources naturelles mobilisées et des émissions rejetées dans le milieu naturel (air, eau, sols) ;
- l'évaluation des impacts sur l'environnement de ces consommations et émissions ;
- l'interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs initiaux.

La norme internationale ISO s'applique en France par la norme NF P 01-010. Contrairement aux normes ISO qui fixent un cadre minimal sans limiter le champ de l'étude, la norme française fixe des règles précises quant à l'élaboration de l'AVC (liste d'impacts, modèles énergétiques, modèles de transport, flux de matières et d'énergies, flux négligeables à prendre en compte).

Les résultats de l'évaluation s'expriment pour les produits de construction suivant la norme NF P 01-010, selon 10 indicateurs d'impact : consommation d'énergie primaire renouvelable et non renouvelable, consommation d'eau, production de déchets solides, épuisement des ressources naturelles, changement climatique, destruction de la couche d'ozone, acidification atmosphérique, formation d'ozone photochimique, pollution de l'air et pollution de l'eau.

Selon la série de normes ISO 14040, l'ACV est la « compilation et l'évaluation des consommations d'énergie, des utilisations de matières premières, et des rejets dans l'environnement, ainsi que l'évaluation de l'impact potentiel sur l'environnement associé à un produit, ou un procédé, ou un service, sur la totalité de son cycle de vie ».

Les unités

Unité fonctionnelle

Elle permet de comparer des matériaux à service rendu identique et non pas à quantité identique.

Selon l'ISO 14040, c'est la performance quantifiée d'un système de produits destiné à être utilisé comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie.

Selon le Comité technique de la base de données INIES, il s'agit de l'unité de compte à laquelle va se référer le bilan environnemental ou ACV. On choisit, par exemple, le m^2 en œuvre pour un produit de couverture, un produit de cloisonnement ou un mur, le mètre linéaire pour une canalisation, l'unité pour un équipement… L'unité fonctionnelle dépend du service rendu par le produit étudié. Elle est définie pour la durée de vie typique du produit. Elle comprend l'ensemble des constituants du produit y compris les emballages. Le déclarant doit fournir la liste des produits complémentaires nécessaires à la mise en œuvre du produit (par exemple, systèmes de fixation comme les vis, colles…). Selon les cas, ces produits complémentaires peuvent ou non être intégrés dans l'ACV.

Selon la norme EN 15 804 : « L'unité fonctionnelle, utilisée comme dénominateur, sert de base pour l'addition des flux de matières et des impacts environnementaux pour n'importe laquelle des étapes du cycle de vie et de leurs modules relatifs au produit de construction ou au service de construction. L'unité fonctionnelle d'un produit de construction est fondée sur :

- l'utilisation fonctionnelle ou les caractéristiques de performance pertinentes quantifiées du produit de construction lorsqu'il est intégré dans le bâtiment, en tenant compte de l'équivalent fonctionnel du bâtiment ;
- la durée de vie de référence (DVR) du produit ou la durée de vie requise du bâtiment dans des conditions d'utilisation définies.

Unités d'énergie

Deux unités sont utilisées pour quantifier une énergie :

> le Joule [J] est une unité du système international (SI) utilisée pour quantifier une énergie, un travail ou une quantité de chaleur. Le Joule étant une infime quantité d'énergie par rapport aux domaines d'utilisation courants, dans les Analyses de Cycle de Vie, on utilise le mégajoule [1MJ = 1000 000 J] ;

> le kilowattheure est une unité de mesure d'énergie correspondant à l'énergie consommée par un appareil de 1 000 watts (1 kW) de puissance pendant une durée d'une heure. Elle vaut 3,6 mégajoules (MJ). C'est l'unité utilisée pour quantifier les consommations d'énergie en exploitation.

Rappel de conversion

> 1kWh = 3,6 MJ ;

> 1 MJ = 0,278 kWh.

4.2.4.3 Unité bâtiment : le m²

Plusieurs types de surfaces peuvent être utilisés :

> **la SHON²**, unité fiscale française utilisée pour déterminer les droits à construire, elle a été utilisée par extension dans les réglementations thermiques. Elle rend difficile les comparaisons internationales ;

> elle est remplacée à dater de mars 2012 par la **« surface de plancher »** définie par le décret n° 2011-2054 du 29 décembre 2011 pris pour l'application de l'ordonnance n° 2011-1539 du 16 novembre 2011 relative à la définition des surfaces de plancher prises en compte dans le droit de l'urbanisme : la surface de plancher de la construction est égale à la somme des surfaces de planchers de chaque niveau clos et couvert, calculée à partir du nu intérieur des façades après déduction :

- des surfaces correspondant à l'épaisseur des murs entourant les embrasures des portes et fenêtres donnant sur l'extérieur,
- des vides et des trémies afférentes aux escaliers et ascenseurs,
- des surfaces de plancher d'une hauteur sous plafond inférieure ou égale à 1,80 mètre,
- des surfaces de plancher aménagées en vue du stationnement des véhicules motorisés ou non, y compris les rampes d'accès et les aires de manœuvres,
- des surfaces de plancher des combles non aménageables pour l'habitation ou pour des activités à caractère professionnel, artisanal, industriel ou commercial,
- des surfaces de plancher des locaux techniques nécessaires au fonctionnement d'un groupe de bâtiments ou d'un immeuble autre qu'une maison individuelle au sens de l'article L. 231-1 du code de la construction et de l'habitation, y compris les locaux de stockage des déchets,
- des surfaces de plancher des caves ou des celliers, annexes à des logements, dès lors que ces locaux sont desservis uniquement par une partie commune,
- d'une surface égale à 10 % des surfaces de plancher affectées à l'habitation, dès lors que les logements sont desservis par des parties communes intérieures ;

2 - La surface hors œuvre nette, SHON se calcule en soustrayant à la surface hors œuvre brute :
- les surfaces des combles et des sous-sols non aménageables
- les surfaces des bâtiments ou des parties de bâtiments aménagés afin de permettre le stationnement de véhicules
- les surfaces des toitures-terrasses, des balcons, des loggias
- les surfaces non-closes
- la surface correspondant à l'isolation des locaux et dont le montant forfaitaire est égal à 5 % de la surface hors œuvre obtenue après déduction des surfaces des combles et sous-sols non aménageables, des bâtiments aménagés pour le stationnement des véhicules, des toitures-terrasses, des balcons, des loggias et des surfaces non closes.

La surface de plancher hors œuvre brute, SHOB, est égale à la somme de l'ensemble des surfaces de plancher de chaque niveau de construction. Ces surfaces sont déterminées à partir du nu extérieur des murs de façade. La surface représentée par l'épaisseur des murs doit être prise en compte tout comme celle des combles et des sous-sols non aménageables, des toitures-terrasses accessibles, des balcons ou encore des loggias.

> **La SDOT** (TRIBU) : La Surface Dans Œuvre Thermique, est la surface de plancher construite, comprise à l'intérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment, après déduction des surfaces comprises par les murs, refends, isolants, trémies d'ascenseur et d'escalier. Sont prises en compte :

- toutes les surfaces de planchers de locaux, chauffés ou non chauffés, compris à l'intérieur de l'enveloppe thermique. Sont concernés les locaux intérieurs aux logements, les locaux inclus dans la surface utile en tertiaire, mais aussi les locaux communs (circulations, halls, sanitaires…),
- les surfaces de serres chaudes, vérandas, atriums, même non chauffés, compris à l'intérieur de l'enveloppe thermique et dont l'isolation avec les locaux chauffés est inexistante ou faible,
- les surfaces de cloisons, les surfaces de plancher bas des gaines ou cages (escalier ou ascenseurs) entièrement incluses dans l'enveloppe thermique et non ventilées ou très faiblement ventilées,
- les surfaces de plancher de locaux techniques, déchets, poussettes, caves, garages, remises…, chauffées ou non chauffées comprises à l'intérieur de l'enveloppe thermique.

Ne sont concernés par les règles ci-dessus que les planchers de locaux dont la hauteur est supérieure à 1,80 m ;

> **la Surface de Référence Énergétique** (abrégée SRE, symbole A_E) est définie dans la norme Suisse SIA 416/1, édition 2007, chapitre 3.2. « C'est la somme de toutes les surfaces brutes de plancher des locaux chauffés ou climatisés, situés au-dessous et au-dessus du niveau du terrain et qui sont comprises à l'intérieur de l'enveloppe thermique. Les surfaces brutes de plancher d'une hauteur utile inférieure à 1,0 m ne comptent pas dans la surface de référence énergétique ». Cette surface est utilisée en Suisse et en Autriche. En Allemagne, la SRE correspond à la surface habitable sans les parois (surface au sol nette). Si l'on veut comparer des indices de dépense énergétique en Allemagne et en Suisse, il faut donc rajouter environ 15 % aux valeurs suisses.

Commentaire : la nouvelle surface de référence, la surface de plancher, est plus proche que la SHON de la SDOT utilisée par le bureau d'études TRIBU et de la SRE utilisée en Autriche et en Suisse. D'un point de vue thermique, ces surfaces sont beaucoup plus cohérentes que la SHON, car elles considèrent la surface de plancher au **nu intérieur** des murs, et reflètent donc mieux la **surface réellement traitée** (à l'intérieur de l'enveloppe thermique).

Pour les calculs d'énergie grise, on comptera bien sûr aussi l'énergie grise des espaces non fermés type préau d'école et on rapportera l'énergie grise totale à l'unité de surface de plancher.

L'énergie grise

Il n'existe pas de définition normalisée de l'énergie grise. Plusieurs définitions coexistent :

En Suisse

Les définitions suivantes sont issues d'organismes utilisant la même base de données (Ecoinvent).

> **SIA, Société suisse des Ingénieurs et des Architectes :** « L'énergie grise, (…) c'est **l'énergie cachée.** L'énergie qui est là mais qu'on ne peut pas voir. L'énergie grise, c'est la somme de toutes les énergies nécessaires à la conception, la production, le transport, l'utilisation et le recyclage d'un produit ou d'un matériau. Votre tasse de café du matin, elle est bourrée d'énergie grise. L'énergie nécessaire à la récolte des grains de café, à leur transport à travers le monde, leur torréfaction, leur mouture, leur emballage. Sans parler de l'énergie grise de la machine à café, dont chaque pièce métallique, chaque morceau de plastique, a nécessité toute une chaîne de dépense énergétique pour arriver jusqu'à vous. Et l'énergie grise, ça compte énormément. Pour fabriquer un frigo, il faut autant d'énergie que ce qu'un modèle ordinaire consomme en quatre ans… Quand on envisage de construire, penser à réduire la consommation, c'est bien. Mais prendre en compte l'énergie grise, c'est tout aussi impor-

tant. Ne serait-ce que parce qu'une fois que cette énergie-là est dépensée, elle ne pourra plus être économisée plus tard… Est-ce que ça vaut toujours la peine de renforcer l'isolation pour réduire ses frais de chauffage, ou est-ce que parfois la dépense en énergie grise est trop grande ? ». Et pour avoir la réponse, adressez-vous à un spécialiste ;

> **La SIA a aussi publié, dans ses normes, le cahier technique CT 2032, l'énergie grise des bâtiments** qui donne des définitions et modes de calculs plus précis. L'énergie grise est la « quantité **d'énergie primaire non renouvelable nécessaire pour tous les processus** en amont, depuis l'extraction des matières premières jusqu'aux procédés de fabrication et de transformation, et pour l'élimination, y compris les transports et les moyens auxiliaires nécessaires à cet effet ».

Par exemple, pour un béton d'une classe de résistance C30/37 ;

- **Fabrication :**
  - préparation de toutes les matières initiales déterminantes (gravier, ciment, additifs, eau), à compter de l'extraction,
  - fourniture de l'énergie requise (électricité, huile lourde, charbon, matière résiduelle combustible, etc.) pour la fabrication et le transport, à compter de l'extraction des matières premières,
  - fourniture et élimination de l'infrastructure (fabriques, routes mines, etc.),
  - toutes les émissions engendrées.
- **Élimination du béton :**
  - travaux de démolition, y compris énergie de production, transports et émissions,
  - fourniture de l'infrastructure pour tous les travaux de démolition,
  - élimination dans des décharges ou recyclage.

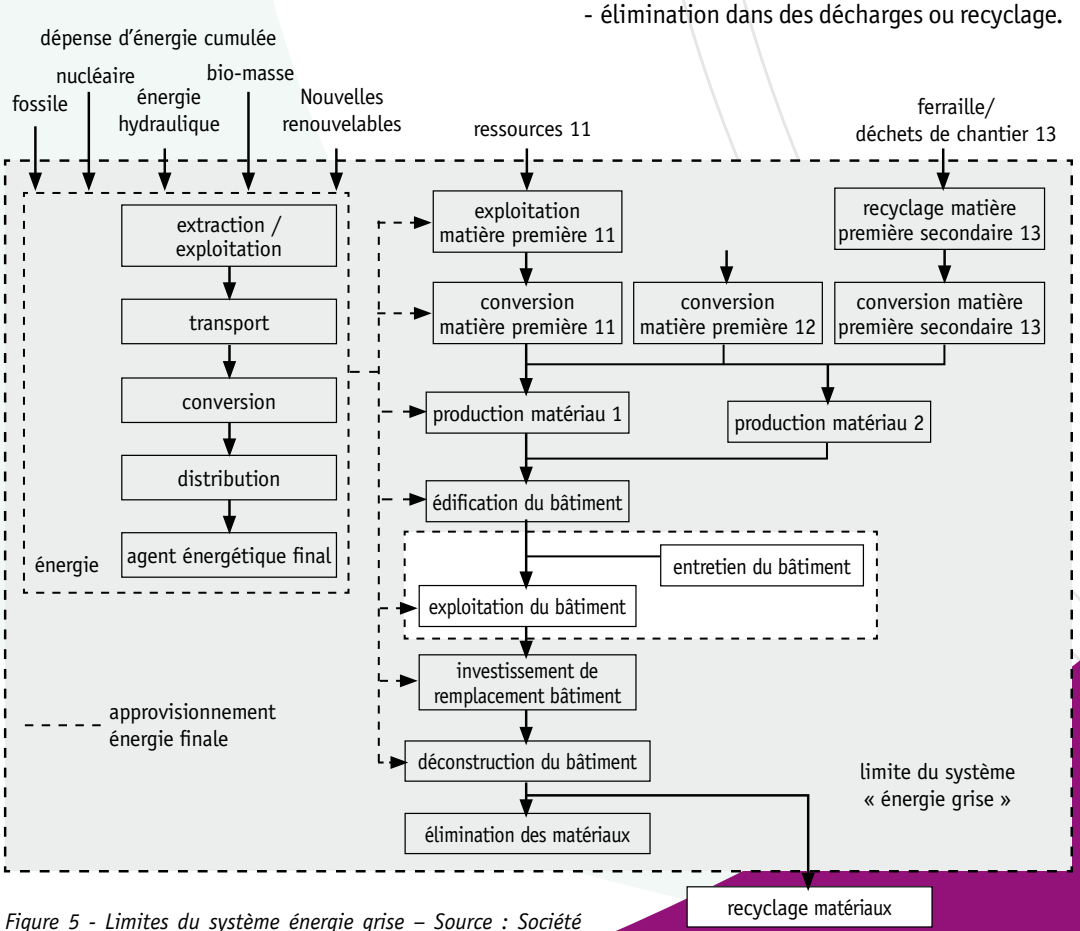


Figure 5 - Limites du système énergie grise – Source : Société des Ingénieurs et Architectes, SIA - Cahier Technique, CT 2032 – 2010

Ne sont pas compris :

- le transport à partir de l'usine de béton,
- le traitement sur le chantier,
- l'entretien éventuel pendant l'utilisation.

Le schéma montre les différents types d'énergie comptabilisés dans l'énergie grise d'un bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie.

> **MINERGIE®,** label de qualité suisse destiné aux bâtiments neufs ou modernisés : « Ce terme d'énergie grise désigne d'une manière générale la **consommation totale d'énergie associée au cycle de vie d'un produit ou à la fourniture d'un service.** Il inclut tous les processus en amont et tous les processus auxiliaires, notamment l'extraction des matières premières, les transports, les traitements et la fabrication. Pour un bâtiment, l'énergie grise est la consommation totale d'énergie associée à sa construction et à sa déconstruction, y compris les éventuels investissements au cours du cycle de vie pour le remplacement d'éléments arrivés au terme de leur durée de vie. En supposant que le bâtiment et ses éléments pris individuellement ont des durées de vie moyennes, le calcul donne une énergie par unité de surface et par année. L'énergie grise d'un bâtiment ne comprend pas l'énergie nécessaire à son exploitation et à son entretien ».

En France

> **Base de données INIES :** pas de mention de l'énergie grise mais une définition précise de l'énergie matière et de l'énergie procédé :

- **Énergie matière : elle correspond à la part de l'énergie primaire contenue dans les matériaux** entrant dans le système non utilisés comme combustibles (par exemple la consommation de pétrole entrant dans la composition du produit fabriqué, le potentiel calorifique du bois, des polymères…),
- **Énergie procédé : apport d'énergie nécessaire dans un processus** élémentaire pour mettre en œuvre le processus ou faire fonctionner l'équipement correspondant, à l'exclusion des entrants énergétiques de production et de livraison de cette énergie (ISO 14040),
- **Énergie primaire totale : elle représente la somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles** telles que le gaz naturel, le pétrole, le charbon, le minerai d'aluminium, la biomasse, l'énergie hydraulique, le soleil, le vent, la géothermie (NF P01-010) ;

> **Agence Local de l'Énergie de l'Agglomération Lyonnaise, ALE[3]** : « On appelle "énergie grise" l'énergie nécessaire à un service, ou à la fabrication d'un bien, incluant l'extraction ou la récolte, la transformation, la commercialisation (emballage, transport, stockage et vente) jusqu'au stade ultime de son élimination. On peut aussi parler de **"contenu énergétique".** » ;

> **CSTB[4] :** L'énergie grise est **l'énergie primaire procédé consommée tout au long du cycle de vie** d'un composant d'ouvrage ;

> **Projet de norme EN 15804 de juillet 2011 :** « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - déclarations environnementales sur les produits - règles régissant les catégories de produits de construction », vise à harmoniser les déclarations environnementales sur les produits (DEP). Il retient comme impact environnemental pour l'énergie « Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles[5]», et précise que les DEP devront détailler l'utilisation de l'énergie primaire renouvelable et non renouvelable en tant que matière première *(feedstock[6])* et en dehors de cet usage ;

3 - Les fiches techniques de l'Agence locale de l'énergie de l'agglomération lyonnaise – février 2005
4 - Source : CSTB, Dr Jacques Chevalier, Assises nationales de l'énergie grise, 15 avril 2011
5 - Ressources abiotiques = ressources non renouvelables d'origine minérale (y compris pétrole et gaz naturel, d'origine organique mais fossile). Le projet de norme distingue l'épuisement des ressources combustibles fossiles, quantifié en MJ, et celui des autres ressources abiotiques, quantifié en équivalents-Antimoine (Sb-equ).
6 - Feedstock : énergie contenue dans un matériau combustible et susceptible d'être valorisée en fin de vie du produit contenant ce matériau par incinération avec récupération d'énergie.

> FCBA, l'institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, Claire Corniller :

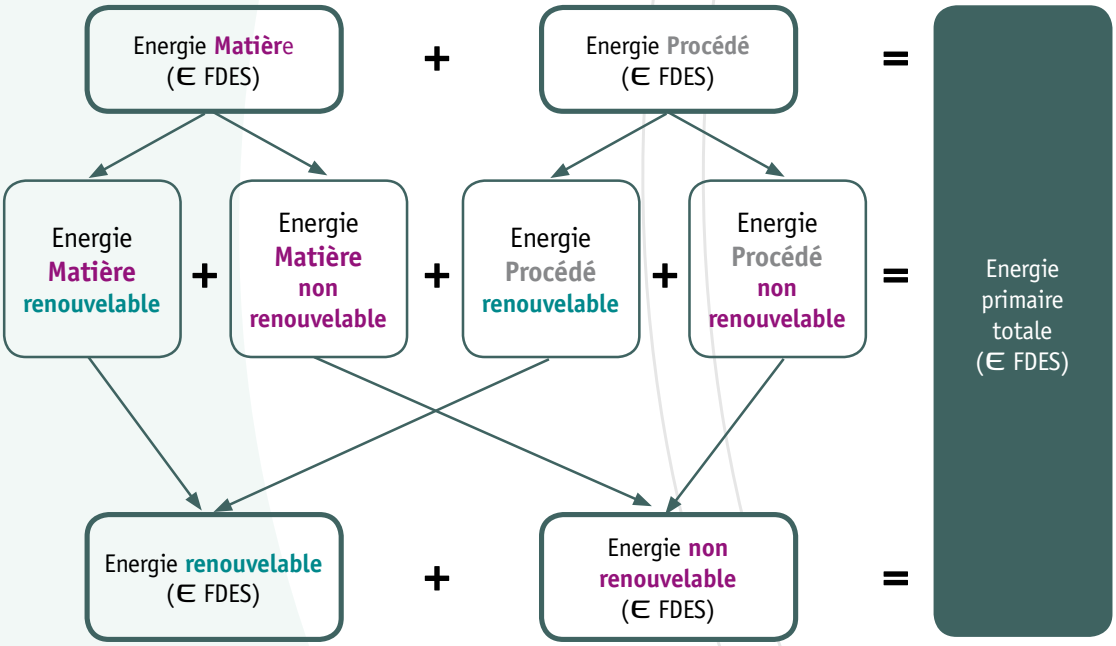


Figure 6 - Les différentes énergies qui composent l'énergie grise - FCBA, Claire Corniller - ICEB Café du 27/10/2009

POINTS À RETENIR

Périmètre de l'étude et nature de l'énergie

Si toutes ces définitions parlent bien d'énergie consommée sur le cycle de vie d'un produit, elles diffèrent sur les points suivants :

> Le périmètre du cycle de vie du produit qui peut inclure ou non :

- les opérations d'entretien/maintenance,
- la mise en œuvre sur le site,
- le traitement des déchets ;

> La nature de l'énergie comptabilisée :

- énergie renouvelable et non renouvelable ou énergie non renouvelable seulement,
- énergie matière et procédé ou énergie procédé seulement.

Base de données	Périmètre du cycle de vie	Nature de l'énergie comptabilisée
INIES	Construction Transport depuis l'usine (valeur forfaitaire) Exploitation Déconstruction	Énergie primaire totale
ECOINVENT	Construction Déconstruction	Énergie primaire procédé non renouvelable

Comparaisons entre les différents types d'énergie

Comparaison entre énergie primaire totale et énergie renouvelable pour deux parois verticales de conductivité thermiques U = 0,15 W/m².K à partir des données de eco-bau, KBOB, l'une « massif » en brique de terre cuite + isolation extérieure, l'autre en « ossature bois ». Source : L'énergie grise des bâtiments – Weinmann-Energies SA, Francine Gass – Lunch-débat – 18 juin 2010

Si l'on ne regarde que l'énergie primaire globale, le bois est pénalisé car, étant combustible, il contient de l'énergie matière. Par contre, lorsqu'on ne regarde plus que l'énergie non renouvelable, le bois devient intéressant car cette énergie matière est renouvelable (si le bois provient d'une forêt non primaire gérée durablement).

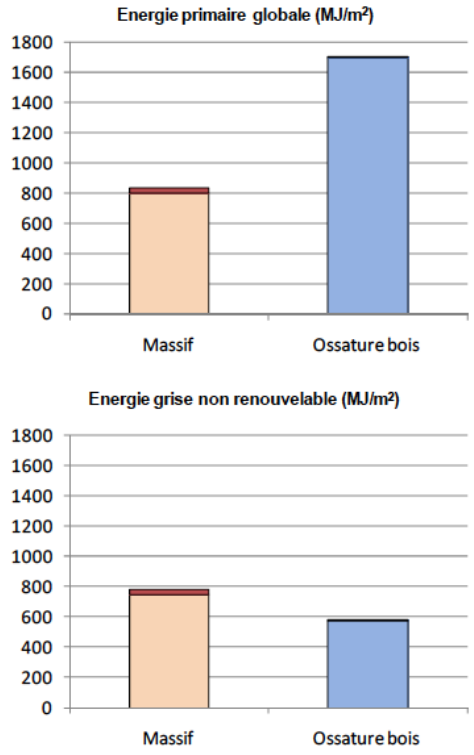


Figure 7 - Comparaison de l'énergie grise de deux parois verticales – L'énergie grise des bâtiments – Weinmann-Energies SA, Francine Gass – Lunch-débat – 18 juin 2010

Pour cinq revêtements de sol sur une durée de vie de 30 ans, comparaison entre énergie primaire totale, énergie renouvelable et non renouvelable, énergie matière et énergie procédé (avec des unités fonctionnelles équivalentes et renouvellement pour la moquette, le linoleum et le PVC dont les durées de vie médianes sont respectivement de 10 et 20 ans). Source des données : FDES des revêtements, calculs : AILTER

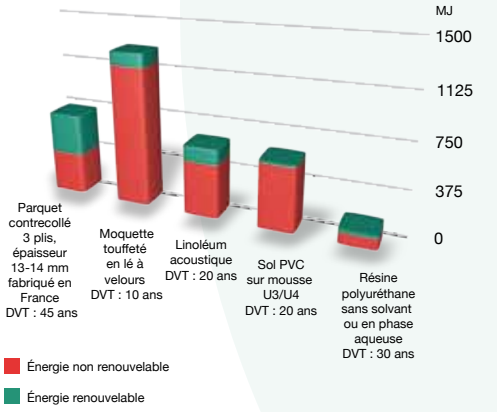


Figure 8 - Comparaisons entre énergies primaire totale, énergie renouvelable et non renouvelable pour des revêtements de sol - AILTER, 2011

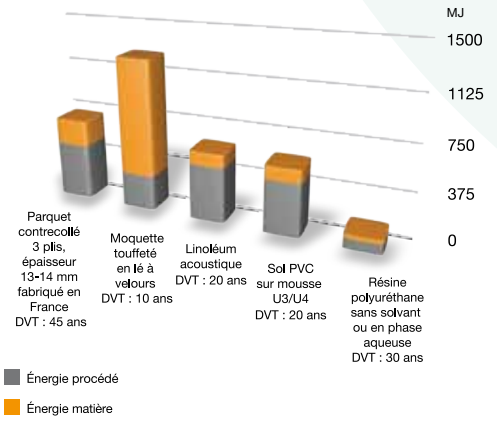


Figure 9 - Comparaisons entre énergies primaire totale, énergie procédé et énergie matière pour des revêtements de sol - AILTER, 2011

Commentaires :

> en énergie totale, c'est la moquette qui est la plus consommatrice ;

> en énergie non renouvelable, c'est encore la moquette qui est la plus consommatrice ;

> en énergie procédé, trois revêtements sont les plus consommateurs, le parquet, le linoléum et le PVC. La moquette est le revêtement qui a la plus faible énergie procédé après la résine ;

> en termes d'énergie matière, c'est encore la moquette la plus consommatrice. Pour certaines moquettes, cette énergie matière est valorisée en fin de vie par du recyclage.

Explications :

> la moquette est composée de 100 % de polyamide pour sa couche apparente fabriquée à partir de matière première d'origine fossile, ce qui explique sa forte consommation en énergie matière d'origine non renouvelable ;

> le parquet contrecollé a lui aussi une part importante d'énergie matière, du bois mais d'origine renouvelable (sauf pour la colle et l'emballage du produit) ;

> le parquet contrecollé a une durée de vie de 45 ans : si le calcul était fait sur cette durée de vie au lieu de 30 ans, alors le parquet serait dans les moins consommateurs en énergie procédé.

POINTS À RETENIR

Définition de l'énergie grise d'un matériau proposée par l'ICEB :

L'énergie grise d'un matériau, équipement ou service est constituée de deux énergies grises :

- l'énergie grise non renouvelable : énergie procédé (apport d'énergie nécessaire dans les processus mis en œuvre pendant le cycle de vie) d'origine non renouvelable,
- et l'énergie grise renouvelable : énergie procédé d'origine renouvelable.

Sur toute la durée du cycle de vie hors vie en œuvre.

4.3 – La définition de l'ICEB

L'ICEB, après avoir analysé ces définitions, a décidé de retenir les définitions suivantes.

L'énergie grise d'un matériau

Pour schématiser, l'énergie grise est l'énergie « perdue », c'est la dette énergétique, alors que l'énergie matière (aussi appelée le « feedstock ») est du stock d'énergie, mobilisé de manière temporaire. L'énergie matière peut être récupérable en fin de vie, soit par le réemploi, soit par la valorisation matière, soit par la valorisation énergétique sous réserve que :

> les filières de recyclage existent. C'est le cas par exemple pour le bois, certaines moquettes avec récupération des matériaux de la sous couche et de la couche apparente, les profils PVC… Pour le verre des baies vitrées, même si le verre est un matériau recyclable, les filières de recyclage ne sont pas toujours disponibles même si on commence à avoir des opérations avec 40 % de recyclage ;

> il est effectivement possible récupérer la matière en fin de vie. La peinture a une énergie matière d'environ 1/3 de son énergie primaire totale mais irrécupérable car impossible à désolidariser de son support.

Pourquoi compter deux énergies grises renouvelable et non renouvelable ?

> L'énergie est une ressource rare. Si elle est consommée dans un process, elle ne sert pas ailleurs. L'objectif est de diminuer l'ensemble des consommations d'énergie partout où cela est possible ;

> produire et distribuer de l'énergie nécessite de l'énergie et ceci quel que soit le type d'énergie (voir schéma ci-après) ;

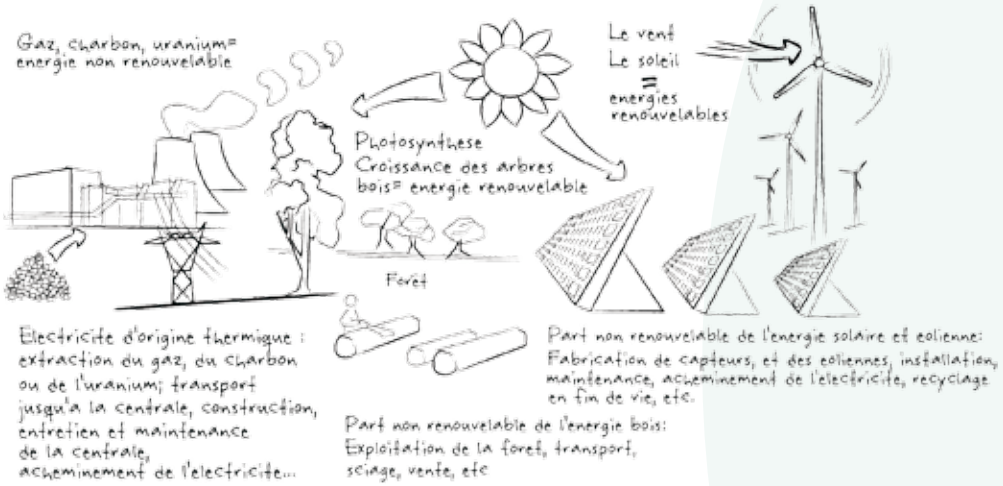


Figure 10 - Exemples illustrant les besoins en énergie pour la production et la distribution d'énergie. Source : GT ICEB

- il est important de séparer énergie non renouvelable et énergie renouvelable car elles n'ont bien sûr pas les mêmes impacts environnementaux ni la même fragilité de la ressource ;
- à énergie grise totale équivalente, on pourra par cette distinction privilégier des process de fabrication utilisant plutôt des énergies renouvelables, ce qui est d'une part moins impactant et d'autre part une incitation pour les industriels à développer ce mode de production.

Pourquoi ne pas compter les impacts pendant la vie en œuvre ?

On ne maîtrise pas les hypothèses prises pour la vie en œuvre sur les consommations d'énergie réalisées ou évitées. Elles peuvent être très éloignées de la réalité. Par exemple, l'entretien d'un revêtement de sol est très différent selon les types de locaux (par exemple dans un bureau et dans un hôpital) et une moyenne n'a pas nécessairement de sens.

L'énergie grise d'un bâtiment

Pour l'énergie grise d'un bâtiment la définition retenue est la suivante :

En ceci, la définition de l'ICEB se rapproche de celle de la norme EN 15 978 : « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul » qui définit l'énergie grise d'un bâtiment comme l'énergie nécessaire à la mise à disposition de l'ouvrage :

- Construction (dont préparation du terrain) ;
- entretien/maintenance ;
- démolition/déconstruction (dont élimination des déchets et remise en état du terrain).

Ainsi, la seule différence est dans la prise en compte de l'entretien (oui pour la norme, non pour l'ICEB).

L'unité que nous retenons est le kWh pour pouvoir faire un bilan global d'énergie consommée sur tout le cycle de vie du bâtiment et des comparaisons entre les poids relatifs de l'énergie grise et de l'énergie consommée en exploitation.

Durée de vie des matériaux / équipements et durée de vie des ouvrages

Les composants d'un bâtiment ont des durées de vie différentes de celle du bâtiment. Dans la plupart des cas, leur durée de vie est inférieure à celle du bâtiment, ils seront donc remplacés une ou plusieurs fois pendant la durée de vie du bâtiment. Leur énergie grise est comptabilisée à la construction, puis à chaque remplacement.

POINTS À RETENIR

Définition de l'énergie grise d'un bâtiment proposée par l'ICEB

L'énergie grise d'un bâtiment est la somme des énergies grises des matériaux et équipements qui le composent à laquelle on ajoute :

- l'énergie nécessaire au déplacement de ces matériaux et équipements entre l'usine et le chantier,
- la consommation d'énergie du chantier complémentaire à celle déjà intégrée dans l'énergie grise des composants et équipements (base vie, énergie de mise en œuvre, transport des personnes),
- les énergies grises liées au renouvellement des matériaux et équipements qui ont une durée de vie inférieure à celle du bâtiment,
- l'énergie nécessaire à la déconstruction de l'ouvrage.

Elle ne comprend pas l'entretien (nettoyage et petites réparations).

Nota : la réfection de la peinture ne fait pas partie de l'entretien.

Exemple d'un bâtiment d'une durée de vie de 80 ans :

PRODUIT	DURÉE DE VIE EN ANNÉES	NOMBRE DE REMPLACEMENTS SUR LA DURÉE DE VIE DU BÂTIMENT	FACTEUR MULTIPLICATIF À APPLIQUER À L'ÉNERGIE GRISE DU PRODUIT POUR LE CALCUL DE L'ÉNERGIE GRISE DU BÂTIMENT
Structure béton	100	0	1
Fenêtre aluminium, PVC ou bois	30	2	3
Façade panneaux fibres ciment	60	1	2
Revêtement de sol grès cérame	50	1	2
Revêtement de sol en moquette	10	7	8
Peinture	30	2	3

La durée de vie des matériaux doit être en adéquation avec la durée de vie souhaitée pour le bâtiment. Pour un bâtiment à durée de vie plutôt longue, plus la durée de vie du matériau est courte, plus l'impact sur l'énergie grise sera important à l'échelle de la durée de vie du bâtiment. Pour un bâtiment ou aménagement à durée de vie courte (structure éphémère, aménagement intérieur d'un point de vente…), l'utilisation d'un matériau à durée de vie beaucoup plus longue représente nécessairement une perte d'énergie grise, sauf s'il est réutilisé dans un autre bâtiment sans transformation.

Figure 11 - Schéma des modes de transport des matériaux et équipements depuis les sites de production vers le chantier - Source GT ICEB

L'impact du transport entre lieu de production et chantier

Plusieurs méthodes de calcul existent pour le calcul des impacts lié au transport :

> **L'outil développé par TRIBU** (voir chapitre 6.2) permet de prendre en compte non seulement la distance entre le site de production et le chantier mais aussi le mode de transport. Par exemple, une ardoise venant de Chine par camion jusqu'au bateau puis par bateau jusqu'en France puis par péniche jusqu'au chantier pourra avoir un supplément d'énergie grise plus faible qu'une ardoise d'Espagne si le chantier est desservi par un port fluvial. En complément du critère énergie grise qui ne conduit pas nécessairement à privilégier le choix de matériaux locaux, il est important de prendre en compte que ce type de choix permet de participer au développement de filières économiques locales.

> **La méthode du Bilan Carbone® de l'ADEME** (données 2000) donne les valeurs suivantes pour transporter 1 tonne de marchandise sur 1 kilomètre :

	En gramme d'éq. pétrole	En kWh (1 tep = 11630 kWh)
En voiture légère	138,1	1,6
En avion court courrier	Un peu plus qu'en voiture	
En avion long courrier	Un peu moins qu'en voiture	
En camion poids lourd	42	0,49
En chemin de fer	5,8	0,07
Par voie d'eau	12	0,14

> **Le fascicule de données de la norme P01-015 de février 2006 qui sert de base pour les calculs des FDES.** Quand on complète les résultats d'une FDES en intégrant le transport entre l'usine et le site, il faudrait, pour être cohérent, utiliser ces données.

En complément de l'énergie nécessaire par km transporté, il faut aussi regarder le taux de remplissage des véhicules, le retour à vide ou plein, les éventuelles transformations complémentaires des matériaux (Exemple vécu : des fenêtres fabriquées sur place avec du bois de pays pour un chantier dans les Vosges font un aller et retour en camion jusqu'en Espagne pour y être lazurées).

L'intégration de ce supplément d'énergie grise lié au transport est traduite dans la certification LEED par le gain d'un point si un certain pourcentage des produits mis en œuvre est extrait et fabriqué dans un rayon de moins de 800 km du chantier.

Ecole du Fort et boulodrome à Issy-les-Moulineaux - Architectes : Sonia Cortese, mandataire, Bernard DUFOURNET, associé. Photo : ADSC

5. Où se cache l'énergie grise dans un bâtiment ?

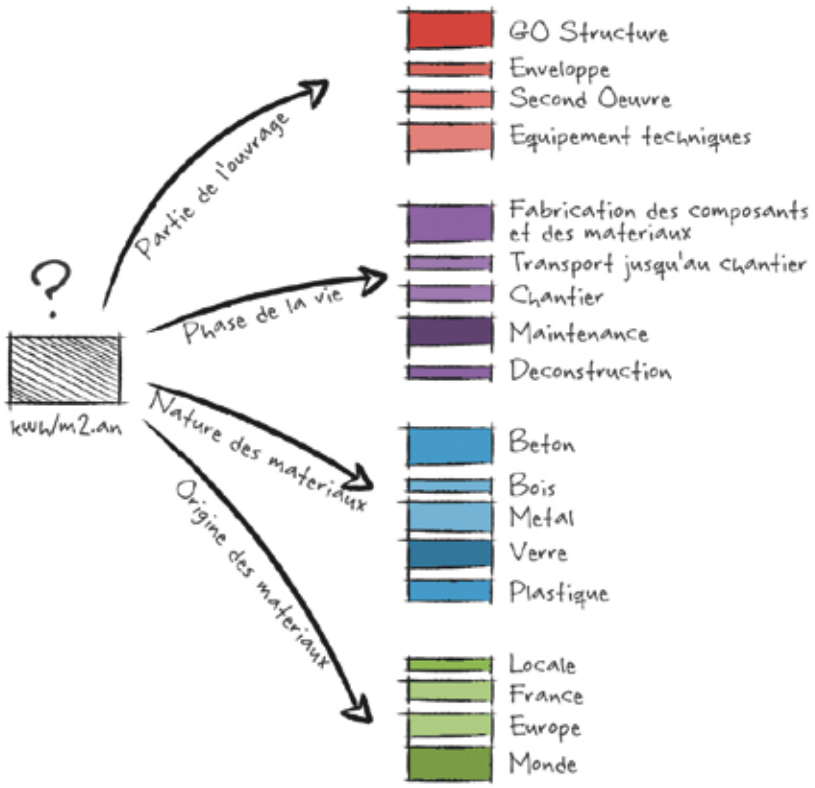


Figure 12 - Les composantes de l'énergie grise d'un bâtiment - Source GT ICEB

5.1 – Exemples commentés des membres de l'ICEB

Les membres du groupe de travail ont réalisé des calculs d'énergie grise sur plusieurs projets à différents stades d'études (concours et APD) en utilisant plusieurs types d'outils :

- une école zéro énergie pour MÉANDRE avec l'outil Econsten et la base de données Ecoinvent ;
- une crèche avec deux variantes constructives, deux musées (un neuf et un en réhabilitation), un bâtiment de bureau pour TRIBU avec un outil interne et la base de données KBOB ;
- huit collèges pour Le Sommer Environnement avec l'outil ELODIE et la base de données INIES ;
- une aire de service pour les ENR avec l'outil ELODIE et la base de données INIES ;
- la réhabilitation d'un immeuble de bureau et un bâtiment à usage mixte habitation/bureaux pour SYMOE avec la méthode Bilan carbone.

La diversité des types de bâtiment, de leur durée de vie, des méthodes de calcul, des bases de données, des modes de modélisation rendent la synthèse très difficile. Néanmoins, nous avons tenu à décrire ces calculs et à les commenter pour alimenter la réflexion des

lecteurs et partager avec eux les résultats et les interrogations qui en découlent afin de faire progresser la culture commune sur un sujet encore peu mature.

Chacun des bâtiments étudiés est au moins au niveau BBC 2005 pour les consommations d'énergie en exploitation.

Pour chacun des calculs, dès que les données étaient disponibles, l'énergie grise a été décomposée par poste :

- structure = infrastructure (fondations) + superstructure (structure horizontale, verticale et charpente) ;
- enveloppe = isolation + couverture/étanchéité + fenêtres (vitrage + menuiserie) + protections solaires + serrurerie/métallerie ;
- aménagement intérieur = cloisonnements + revêtements intérieurs + menuiseries intérieures + panneaux acoustiques éventuels ;
- équipements : équipements de chauffage, ventilation, rafraîchissement, plomberie, électricité, inclus câblages et tuyaux et panneaux solaires.

Le détail des résultats des calculs figure dans l'annexe 2.

École zéro énergie à Pantin – Méandre

Figure 13 – École zéro énergie à Pantin architecte : Méandre – Photo : Olivier Wogenscky

Pour atteindre l'objectif « zéro énergie » lors de la conception de l'école Saint-Exupéry à Pantin, l'équipe de maitrise d'œuvre a travaillé très finement par un jeu d'allers et retours entre les simulations sur modèles informatiques et la conception architecturale et technique pour réduire au maximum les consommations[7]. La production d'électricité de la toiture photovoltaïque permet ensuite de compenser annuellement les consommations du bâtiment lui-même (chauffage, ventilation, éclairage, 14 kWh/m²$_{SHON}$.an) et des usages à l'intérieur du bâtiment (informatique, bureautique, cuisine, 8 kWh/m²$_{SHON}$.an).

La répartition classique de la consommation d'énergie sur le cycle de vie d'un bâtiment (3/4 pour l'exploitation et 1/4 pour la construction) est bouleversée puisque les consommations en phase exploitation sont ramenées à zéro. Seule subsiste l'énergie « grise » qu'il devient plus qu'intéressant de calculer.

La société Énergies Demain développait à cette époque des logiciels avec bases de données pour calculer les impacts environnementaux de produits de grande consommation.

Le logiciel Econsten utilise la base de données suisse Ecoinvent et donne des résultats annualisés[8] sur 5 indicateurs : énergie, émissions de GES (Gaz à Effet de Serre), consommation d'eau, déchets ultimes, déchets nucléaires.

L'annualisation a permis de comparer les consommations d'énergie grise avec les consommations en phase exploitation qui nous sont familiers.

L'hypothèse de durée de vie du bâtiment est de 80 ans.

Le logiciel Econsten inclut l'entretien du bâtiment et le remplacement des ouvrages, sols, peinture, fenêtres, façades, etc. suivant leur durée de vie prévue. Ce qui évidemment alourdit le résultat total puisqu'au bout de 80 ans tous les éléments sont remplacés une à plusieurs fois à part la structure primaire.

7 - Patte, Emmanuelle (Méandre, architecte) et Houdant, Nicolas (Energies Demain). Analyse du cycle de vie d'un bâtiment « zéro énergie ». Concevoir et construire un bâtiment « zéro énergie ». L'école du Centre à Pantin d'Emmanuelle Patte. ICEB Café, 28 Octobre 2008.

8 - Annualisé : ramené à une annuité de durée de vie du bâtiment.

Le résultat, 43 kWh/m²$_{SHON}$.an, montre bien que l'énergie grise n'est pas du tout négligeable. Ce résultat total est plus élevé que ceux des autres exemples présentés à cause de la longue durée de vie du bâtiment et du nombre important de composants remplacés.

Figure 14 – École zéro énergie à Pantin architecte : Méandre – Photo : Olivier Wogenscky

À l'époque, n'ayant pas connaissance d'autres résultats de calculs, nous avons exploré des variantes :

1) Si nous avions construit un bâtiment respectant la RT 2005 au lieu de « pousser » jusqu'à zéro énergie, les impacts environnementaux auraient-ils été moindres ? (Pas de triple vitrage, moins d'isolant, pas de panneau photovoltaïque).

Le calcul montre que le sur-impact environnemental est amorti en 1,4 à 5,6 ans suivant les indicateurs. Pour l'énergie grise, la surconsommation sur la durée de vie du bâtiment est de 13 % avec un retour sur investissement énergétique de 1,4 ans.

2) Si nous remplacions le bois par du béton ou de la maçonnerie ? À notre grande surprise, nous étions meilleurs en béton du point de vue de l'énergie, alors que nous avions appris que pour un service rendu (poutre de 6 m de portée supportant 1 tonne) le bois demandait 4 fois moins d'énergie que le béton.

En questionnant les experts, nous avons réalisé que le calcul de l'énergie grise des matériaux amalgamait l'énergie procédé et l'énergie matière, ce qui désavantageait le bois qui a une forte énergie matière d'origine renouvelable.

3) Nous avons testé des variantes sur des matériaux de second œuvre pour constater que les différences n'étaient pas significatives étant donnée leur faible part dans le bilan énergie d'un tel bâtiment.

En conclusion, les architectes savent aujourd'hui faire des bâtiments à énergie positive pour la phase exploitation. Il nous faut désormais réfléchir aux impacts de la fabrication des bâtiments.

Crèches, musées, bâtiments de bureaux - TRIBU

L'outil de calcul d'énergie grise créé et utilisé par le bureau d'études TRIBU est un outil simplifié d'aide aux choix de conception dès les phases initiales des projets de conception de bâtiment.

L'outil est présenté dans la suite du dossier, au chapitre 6.2.

Les résultats analysés ici sont issus de calculs réalisés avec l'outil TRIBU, en phase concours ou APS. Ces résultats n'étaient pas initialement destinés à être comparés, ils ont été réalisés par des chefs de projets différents, à des stades de projets différents. Cependant, il nous a semblé intéressant de les confronter entre eux pour tenter d'en tirer des conclusions.

La consommation totale en énergie grise (considérée par l'outil TRIBU comme l'énergie primaire procédé non renouvelable) est comprise entre 1100 et 1800 kWh/m²$_{SHON}$ pour 50 ans de durée de vie, soit 30 à 36 kWh/m²$_{SHON}$.an. La valeur la plus basse de 1100 kWh/m²$_{SHON}$ est cependant à nuancer car le calcul effectué n'intègre pas le poste « aménagement intérieur », qui peut représenter environ 300 kWh/m²$_{SHON}$.

Cinq calculs réalisés avec l'outil simplifié TRIBU

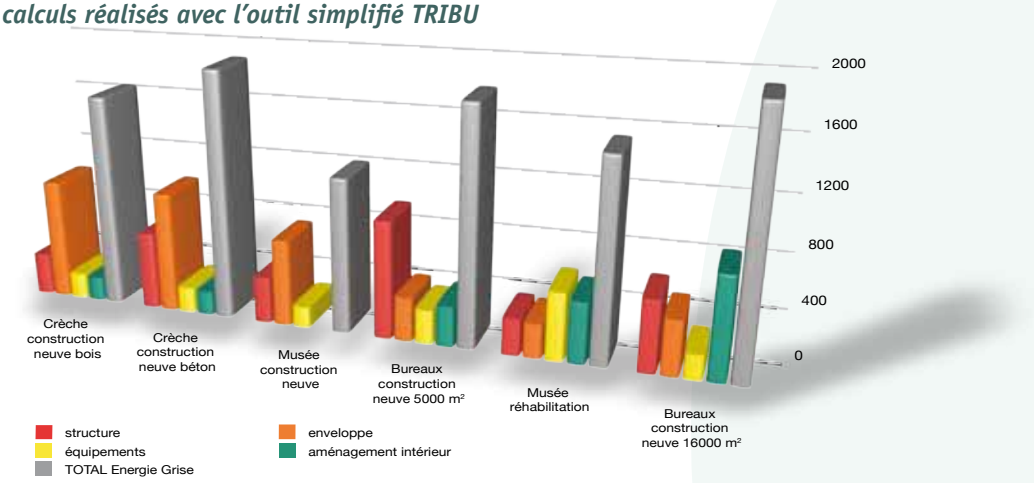


Figure 15 - Calculs TRIBU : bilan des consommations en énergie grise, totale et poste par poste, en kWh/m²shon sur 50 ans de durée de vie du bâtiment

Ainsi, nous pouvons retenir que la consommation totale en énergie grise est comprise entre 1500 et 1800 kWh/m²$_{SHON}$ pour un bâtiment d'une durée de vie de 50 ans.

La répartition énergétique par poste est difficile à comparer, du fait des différences marquées entre les types de bâtiments. On peut tout de même tirer quelques conclusions générales :

> **La structure du bâtiment compte pour 250 à 800 kWh/m²$_{SHON}$, et occupe en valeur relative de 20 % à 50 % du total énergétique.** Les valeurs faibles comprises entre 250 et 350 kWh/m²$_{SHON}$ correspondent à des projets de réhabilitation, ou des projets dont la structure est autre que le béton (structure bois pour la crèche, façades bois pour le musée en construction neuve). Deux variantes ont été calculées pour le projet de crèche, les résultats sont clairs : le passage d'une structure bois à une structure béton augmente de 250 kWh/m²$_{SHON}$ la consommation en énergie grise.

Les valeurs plus élevées aux alentours de 500 kWh/m²$_{SHON}$ correspondent à des projets en structure béton. Le projet de bureaux de 5000 m²$_{SHON}$ présente une valeur très élevée (800 kWh/m²$_{SHON}$) pour la structure, car la charpente métallique a été comptabilisée en détail ;

> **L'enveloppe du bâtiment compte pour 200 à 800 kWh/m²$_{SHON}$, et occupe en valeur relative de 17 % à 57 % du total énergétique.** Les valeurs sont assez variables notamment à cause du choix des isolants et des menuiseries extérieures. Ainsi, les projets avec de l'isolant polyuréthane ou polystyrène et des menuiseries en aluminium sont fortement plus consommateurs en énergie grise que les projets en laine minérale fibre de bois et équipés de menuiseries bois ;

> **Les équipements comptent pour environ 200 kWh/m²$_{SHON}$, soit environ 15 % des consommations totales en énergie grise,** car ils sont pris en compte dans l'outil TRIBU de façon simplifiée, par ratio de tonnage à 0,7 % de la SDO, avec 27 000 kWh/tonne. Le calcul du projet de musée en réhabilitation prend en compte de façon plus détaillée le poste équipements, on atteint alors une valeur plus élevée d'environ 500 kWh/m²$_{SHON}$ soit 35 % du total énergétique ;

> **L'aménagement intérieur compte pour 180 à 750 kWh/m²$_{SHON}$, et occupe en valeur relative de 10 % à 40 % du total énergétique.** Les valeurs sont très variables notamment à cause du choix des revêtements de sol et faux plafonds. Ainsi, les projets avec de la moquette en revêtement de sol sont fortement plus consommateurs en énergie grise que les autres (environ + 10 % sur le total). De la même façon, les projets équipés de faux plafonds métalliques sont plus consommateurs (également environ + 10 % sur le total).

Figure 15 bis - Pôle œunotouristique de Saint-Christol - Architecte mandataire : Philippe Madec. BE Développement durable : TRIBU. Photo : TRIBU

En conclusion, quelques choix de conception peuvent « coûter cher » en énergie grise et peuvent être évités ou utilisés en quantité réduite :

- les structures entièrement béton / acier ;
- les isolants à base de polymères (polyuréthane, polystyrène) ;
- les menuiseries aluminium ;
- les revêtements de sol en moquette ;
- les faux plafonds métalliques.

Huit collèges - Le Sommer Environnement

Préambule

L'étude des impacts environnementaux des huit collèges a été effectuée en phase concours et sur une hypothèse de durée de vie à 80 ans avec le logiciel ELODIE qui utilise la base de données INIES. À ce stade des études, certaines informations sont incomplètes ou manquantes telles que des quantités approximatives ou inconnues de certains matériaux, l'énergie grise des équipements… Les résultats de l'étude concernent donc uniquement les matériaux de construction et d'aménagement.

Le logiciel ELODIE calcule l'énergie primaire totale mais ne distingue pas, pour tous les matériaux, l'énergie procédé de l'énergie matière, en particulier pour l'enveloppe et les revêtements intérieurs. Il n'a donc pas été possible d'analyser la part que représente l'énergie primaire procédé dans la construction d'un bâtiment, mais seulement l'énergie primaire totale et sa répartition entre les trois familles.

Contexte

Huit collèges répartis en deux lots ont fait l'objet d'un programme de restructuration pour lequel un Conseil général de la région Île-de-France a lancé une consultation de type partenariat public-privé (PPP) dont l'objectif était d'atteindre un profil environnemental globalement correct en réduisant au maximum les coûts d'investissement. Le profil environnemental a fixé la cible 2 (Choix des matériaux) au niveau base. Les candidats devaient présenter pour chaque lot un collège « zéro énergie », pour lequel la construction hors équipement devait entraîner une consommation en énergie primaire totale inférieure à la consommation en énergie primaire du bâtiment sur une durée de 50 ans hors compensation par la production locale d'énergie.

Description

De manière générale, les procédés constructifs et les principes d'aménagement sont les mêmes pour les huit collèges. Ils ont été plus ou moins adaptés en fonction des particularités de chacun des sites. La base commune est une structure en béton armé de type poteau-poutre et voiles en pré-murs isolés. À cela s'ajoutent différents types de façade (bardage bois et/ou enduit minéral et/ou bardage métallique et/ou bardage polycarbonate). L'aménagement intérieur est sensiblement le même avec des cloisonnements en plaques de plâtre, des revêtements de sol en PVC et carrelage, des revêtements muraux tels que de la peinture et du carrelage. Les équipements n'ont pas été comptabilisés lors des calculs.

Nous pouvons constater dans les graphiques suivants que l'énergie primaire totale des matériaux varie entre 1 630 et 2 600 kWh/m²$_{SHON}$. L'énergie primaire totale du gros œuvre (ici nommé structure) varie entre 522 et 876 kWh/m²$_{SHON}$, celle de l'enveloppe représente entre 599 et 1 228 kWh/m²$_{SHON}$ et celle de l'aménagement intérieur est comprise entre 408 et 672 kWh/m²$_{SHON}$.

Ainsi l'aménagement intérieur représente la partie la plus faible de l'énergie primaire totale. La tendance des graphiques montre que l'enveloppe représente une plus grande part en énergie primaire totale par rapport à la structure, bien que la différence soit faible. L'exception, le collège RAI, présente en effet un impact légèrement plus faible pour l'enveloppe que pour la structure contrairement aux autres collèges.

Répartition des énergies par lot (kWh/m² SHON)

D'autre part, des calculs d'énergie primaire procédé ont également été effectués. Cependant, bien que les valeurs d'énergie procédé existent dans les FDES complètes, cette information est rarement disponible dans le logiciel ELODIE. Elle est notamment quasi absente pour les matériaux d'aménagement, ce qui rend les résultats non représentatifs (voir figures 16 et 17). Les valeurs d'énergie grise sont donc sous-estimées puisqu'elles ne tiennent pas compte de tous les matériaux, mais on peut au moins constater que l'énergie primaire procédé représente au moins la moitié de l'énergie primaire totale.

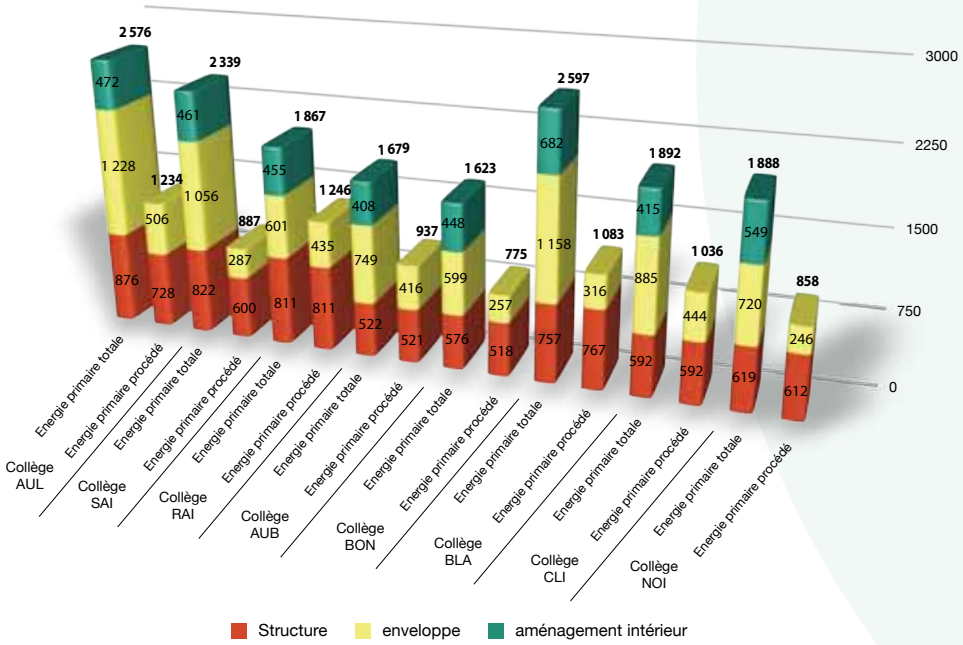


Figure 16 - Répartition des énergies par famille (en kWh/m²SHON) - Le Sommer Environnement

Répartition des énergies par lot (%)

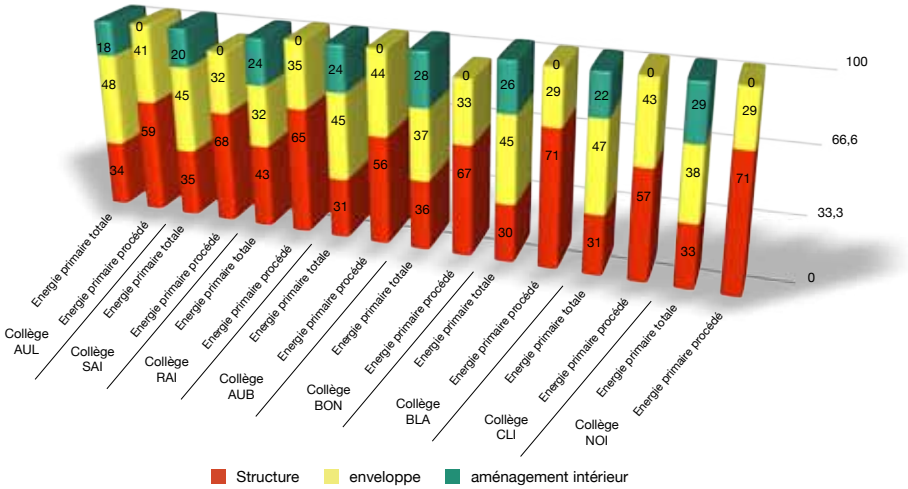


Figure 17 - Répartition des énergies par lot en pourcentage - Le Sommer Environnement

Bâtiment de bureau et bâtiment à usage mixte - SYMOE

Sur nos projets, à défaut de raisonner en consommation d'énergie grise, notre bureau d'étude développe une expertise sur les impacts environnementaux au travers de la quantification des émissions de gaz à effets de Serre (GES) en vue de les réduire sur l'ensemble du cycle de vie des opérations (de la programmation à la reconversion du bâtiment).

Réhabilitation d'un immeuble de bureaux - Boulevard Mac Donald à Paris

Ce projet est une réhabilitation qui profite des fondations et de la superstructure du bâtiment existant.

Le bâtiment de 26 000 m², réparti sur 2 plots, s'organise de la façon suivante :

> 2 niveaux de sous-sols à usage de parking et de livraison ;
> 2 niveaux de superstructure à usage de commerce (reconversion du bâtiment existant) ;
> 5 niveaux en surélévation de l'entrepôt existant (R+2 au R+6).

L'étude réalisée sur la base du dossier APS (Avant Projet Sommaire), ne prend pas en compte la matière déjà mise en œuvre (structures existantes conservées), ni l'énergie nécessaire à la déconstruction. Par ailleurs, faute d'informations complémentaires, nous n'avons pu intégrer que partiellement l'impact des corps d'état de second œuvre. Notre expérience nous a conduits à estimer une majoration des émissions de CO_2, de l'ordre de 10 % pour la mise en œuvre et de 5 % pour les équipements.

L'ensemble des matériaux identifiés dans notre périmètre d'étude pour la réhabilitation/reconversion de ces entrepôts engendre environ 10 000 tonnes de GES.

Projet de réhabilitation d'entrepôts en bureaux - Emissions de GES en tonnes équi. CO_2

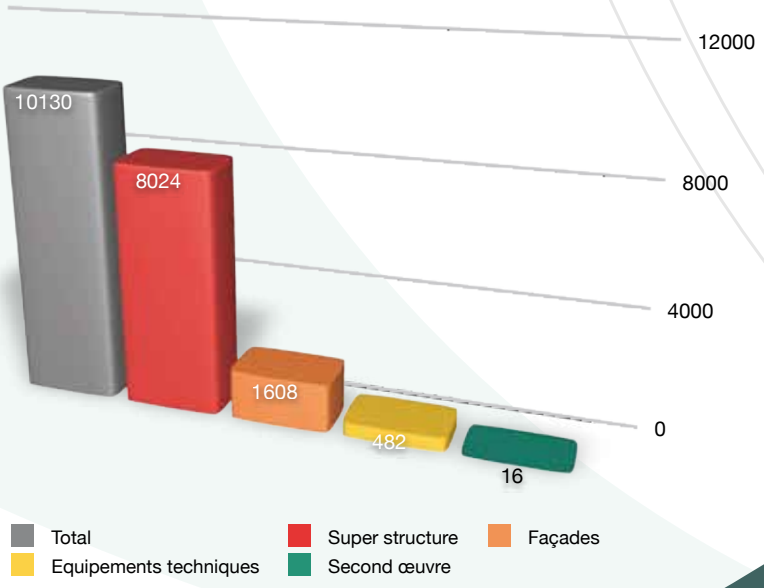


Figure 18 - Projet de réhabilitation d'entrepôts en bureaux – Calcul des émissions de GES pour la réhabilitation/reconversion - SYMOE

Nous observons que les enjeux en termes d'émissions de GES se concentrent principalement dans la superstructure de l'ouvrage. Les matériaux comme l'acier et le béton sont des matériaux présents en grandes quantités et ils impactent de façon significative le bilan global avec 80 % des émissions de GES.

Une approche des émissions de GES, basée sur notre retour d'expérience, permet de montrer le bénéfice d'une réhabilitation/reconversion en comparaison d'une construction neuve (base de 1200 kg éq. CO_2/m²).

Comparaison des émissions de GES entre réhabilitation et construction neuve en tonnes équ. CO_2

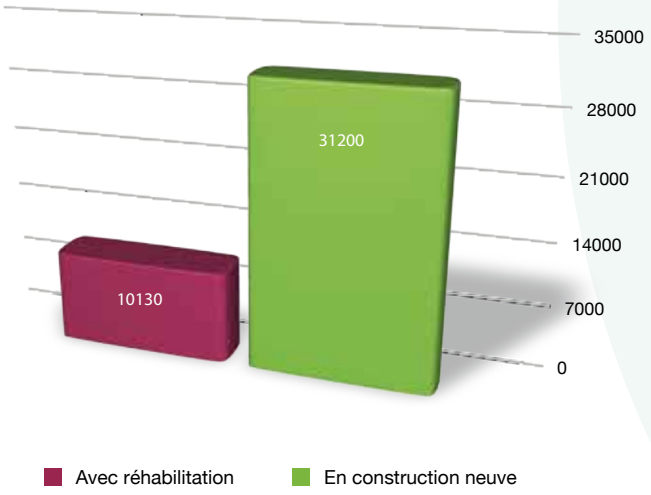


Figure 19 - Comparaison des émissions de GES entre réhabilitation et construction neuve pour des bureaux - SYMOE

Dans ce cas de figure les émissions sont réduites de l'ordre de 70 %. Ceci s'explique par les émissions évitées liées aux structures, celle-ci étant généralement composées de fortes quantités de béton et d'acier impactant en terme d'émissions de GES. En conservant la structure existante, ces émissions sont donc évitées. **La réhabilitation/reconversion est beaucoup plus économe en énergie grise que la construction neuve.**

Bâtiment à usage mixte Bureaux, commerces et logements à Lille

Cette opération est une construction neuve d'un bâtiment d'environ 7 400 m² avec un usage mixte bureaux, commerces et logements. C'est un bâtiment majeur avec une empreinte architecturale forte.

Le périmètre de l'étude prend en compte les quantités de matières première pour :

- l'infrastructure et la superstructure en béton armée ;
- l'enveloppe du bâtiment (le clos couvert avec les isolants, les menuiseries, etc.) ;
- partiellement les corps d'état de second œuvre, faute d'informations ;
- une part des équipements pour environ 20 % des émissions comptabilisées.

La mise en œuvre sur chantier n'a pas été prise en compte dans ce bilan.

Le ratio par surface de ce bâtiment est de l'ordre de 1 500 kg éq. CO_2 par m² avec une part prépondérante pour la structure qui représente 70 % des émissions de CO_2.

Cela s'explique par l'architecture du bâtiment, en effet le bâtiment possède une infrastructure sur 3 niveaux et une superstructure intégralement composée de béton armé. Ce matériau, alliant béton et acier, présent en grandes quantités dans l'enveloppe, est très impactant et pèse fortement sur le bilan global du bâtiment.

Le détail des résultats est développé ci-dessous :

Poste d'émissions	Émissions de GES en tonnes éq. CO_2	Pourcentages
Structure		**71 %**
Gros œuvre	7 817	100 %
Enveloppe		**6 %**
Étanchéité	129	18 %
Façade	194	27 %
menuiseries extérieures	391	55 %
Équipements techniques		**17 %**
Équipements	1 839	100 %
Aménagements intérieurs		**6 %**
Plafond suspendus	52	8 %
Revêtement de sols	79	12 %
Serrurerie	-	-
Électricité	-	-
Menuiseries intérieures	293	44 %
Carrelage	146	22 %
Platerie	68	10 %
Peinture	25	4 %
Total GES	**11 032**	**100 %**

Construction d'un bâtiment à usage mixte (Commerces, bureaux et logements)
Émissions de GES en tonnes équi. CO_2

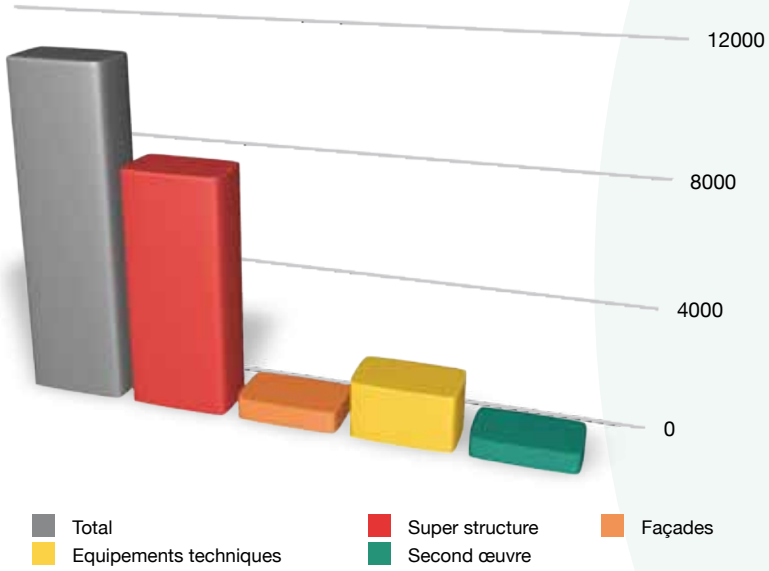


Figure 20 - Construction d'un bâtiment à usage mixte (commerces, bureaux et logements – Calcul des émissions de GES pour la construction - SYMOE

Cette approche permet d'identifier les principaux postes d'émissions de GES à réduire en priorité, quand le projet le permet. Avec des mises à jour régulières permettant de préciser les données en fonction de l'avancement du projet, la méthode devient un outil d'aide à la décision dans le choix des matériaux et des techniques constructives.

En conclusion, nous constatons que les modes constructifs à base de béton armé sont impactants dans le bilan global de nos opérations, tandis que l'usage de bois et la réutilisation de structures existantes en réhabilitation permettent de limiter ces impacts.

Aire de service – Les EnR

Cette réalisation concerne une aire de service d'une surface de 1 020 m² située en Bourgogne. Cette opération est certifiée NF Bâtiments tertiaires – Démarche HQE® et labellisée BBC 2005. Pour répondre au profil environnemental avec un traitement performant de la cible 2 - Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction, les architectes ont réalisé une Analyse de Cycle de Vie des matériaux avec l'outil ELODIE, du CSTB.

La durée de vie souhaitée de ce type de bâtiment est de 30 ans. Une adéquation entre cette durée de vie très courte et les produits, systèmes et procédés de gros œuvre et second œuvre a donc été recherchée.

Pour répondre aux exigences du niveau performant de la cible 2, ont été prises en compte pour le calcul de l'énergie grise :

> deux familles de matériaux du gros œuvre :
- structure porteuse horizontale[9],
- structure porteuse verticale[10].

9 - Poutres bois lamellé collé, poutre acier galvanisé
10 - Complexe RTh, parpaing creux, agglomérés plein, poteaux bois lamellé collé, poteaux béton, poteaux acier galvanisé

> quatre familles de second œuvre :
  - isolation[11],
  - revêtements de sol[12],
  - cloisons[13],
  - faux plafonds[14].

Concernant la décomposition de l'énergie (en kWh/m²$_{SHON}$) en énergie matière / énergie procédé et en énergie renouvelable / non renouvelable, seule l'énergie renouvelable et non renouvelable a été précisée. Effectivement, dans les FDES récupérées auprès des fabricants, certaines ne mentionnaient pas la part d'énergie matière et procédé car seul l'extrait de FDES nous avait été fourni. L'étude n'a pas été complétée sur ce point.

Cette analyse a néanmoins permis de comparer trois types de murs différents pour le Gros Œuvre :

> la brique de terre cuite à alvéoles multiples de type Monomur (FDES « Brique Monomur 37.5 de terre cuite rectifiée pour pose à joint mince »), R = 3 m².K/W ;

> le bloc béton type aggloméré avec isolation extérieure et parement en pierre de Bourgogne ;

> le bloc RTh, constitué de deux blocs creux de béton de part et d'autre d'un panneau de polystyrène expansé (FDES « Mur en maçonnerie de blocs de béton » et « Stisolmur ultra 100 » pour le bloc RTh qui ne dispose pas de FDES), R = 3,22 m².K/W.

Figure 21 : complexe RTh

La solution de l'aggloméré seul avec une isolation par l'extérieur n'a pas pu être retenue du fait du poids conséquent du parement en pierre de Bourgogne, du surcoût et des délais d'installations plus longs.

La solution de brique en terre cuite n'a pas été retenue non plus car sa durée de vie de 150 ans ne correspondait pas à la durée de vie prévue du bâtiment de 30 ans. Son énergie grise se révélait être très élevée (4,8 fois plus d'énergie primaire totale que le bloc béton + isolant et 3,2 fois plus que le complexe RTh). Un des gros avantages du bloc RTh, dont l'isolation est intégrée au bloc, est qu'il peut porter des pierres plates en façade. Cette méthode offre moins de découpes sur site en phase chantier et donc moins de transport.

5.2 – Autres exemples significatifs

Étude COIMBA 2011[15]

Le projet COIMBA est un projet de recherche collaborative ayant pour objectif le développement d'outils d'évaluation quantitative de la qualité environnementale des bâtiments à travers l'analyse de cycle de vie.

Les outils EQUER et SimaPro utilisent la base de données Ecoinvent, l'outil ELODIE, la base de données INIES.

SimaPro est un outil scientifique d'Analyse de Cycle de Vie qui a été développé par PRé Consultant (http://www.pre.nl/) basé aux Pays Bas en coopération avec des spécialistes internationaux en ACV.

> Pour la Maison des Hauts de Feuilly et le bâtiment Nobatek, les consommations d'énergie en exploitation et les

11 - Polystyrène extrudé 100, panneau composite de laine de bois, étanchéité, laine de verre
12 - Grès Cérame pleine masse
13 - Carreaux de terre cuite, cloisons isothermes
14 - Faux plafond acoustique minéral, Idem métallique, plaques de plâtre suspendues
15 - Connaissance de l'impact environnemental des bâtiments – COIMBA 2011 - Développement des outils d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments par analyse du cycle de vie – Auteurs : NOBATEK, ARMINES, CSTB, IZUBA ÉNERGIES, ENERTECH

NATURE DE L'OUVRAGE	SURFACE SHON	DURÉE DE VIE	PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE	MODE CONSTRUCTIF	ÉNERGIE PRIMAIRE TOTALE KWHEP/M^2_{SHON}.AN
Maison individuelle : les Hauts de Feuilly Département 69	157 m^2	50 ans	Passivhaus 56 kWhep/m^2_{SHON} pour les usages RT	Ossature bois	• ELODIE : 62,8 • EQUER : 64 • SimaPro : 75,1
Bâtiment de bureau NOBATEK Département 64	815 m^2	30 ans	64 kWhep/m^2_{SHON} pour les usages RT	Ossature bois, structure en béton banché brut, bardage bois	SimaPro : 72,8
Maison individuelle 1 - Standard Pyrénées -Atlantiques	160 m^2	30 ans	175 kWhep/m^2_{SHON} Cep chauffage : 89 kWhep/m^2_{SHON}	Parpaing, isolation par l'intérieur, ventilation simple flux	SimaPro : 23
Maison individuelle 2 - Basse consommation Pyrénées -Atlantiques	160 m^2	30 ans	110 kWhep/m^2_{SHON} Cep chauffage : 25 kWhep/m^2_{SHON}	Ossature bois, isolation par l'extérieur, ventilation double-flux	SimaPro : 28

consommations d'énergie primaire pour la construction et la fin de vie sont sensiblement équivalentes lorsque ramenées au m^2/an.

> Pour la maison individuelle basse consommation (MI 2), la consommation d'énergie pour le chauffage et la consommation d'énergie primaire pour la construction et la fin de vie sont sensiblement équivalentes lorsque ramenées au m^2/an.

> La différence d'énergie de construction/démolition entre la maison basse consommation et la maison standard est de + 19 % et correspond à 1 mois de gain d'énergie consommée en chauffage de la maison basse consommation.

Impacts des différentes phases - Bâtiment 1

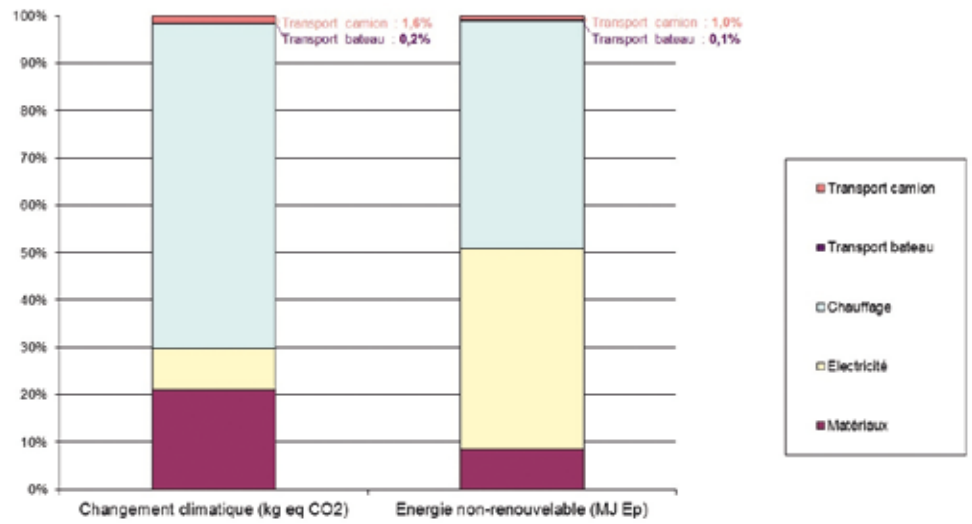


Figure 22 - Étude COIMBA : impact des différentes phases du cycle de vie sur l'énergie primaire non renouvelable pour une maison individuelle conforme à la RT 2005

CSTB – Énergie grise d'une maison individuelle BBC

CSTB, Division Environnement – Assises nationales de l'énergie grise, 15 avril 2011

Pour une maison BBC 2005 d'une durée de vie de 50 ans, la part des produits, matériaux et équipements représente :

- 40 à 65 kWh/m$^2_{SHON}$.an pour l'énergie primaire totale ;
- 34 à 42 kWh/m$^2_{SHON}$.an pour l'énergie primaire non renouvelable.

CSTB Environnement - BENCHMARKING des résultats des projets HQEE / HQE Performance : Premiers résultats – Juillet 2011

Pour toutes les typologies[16] des 79 bâtiments sur lesquels des retours d'expériences ont été menés, les valeurs d'énergie primaire non renouvelable pour la construction de bâtiments d'une durée de vie de 50 ans varient entre 22 et 65 kWh/m$^2_{SHON}$.an avec des valeurs médianes entre 40 et 44 kWh/m$^2_{SHON}$.an. Ces valeurs ont été calculées avec le logiciel ELODIE.

Le CSTB indique que pour un bâtiment, en moyenne, l'énergie procédé non renouvelable représente environ 90 % de l'énergie primaire non renouvelable.

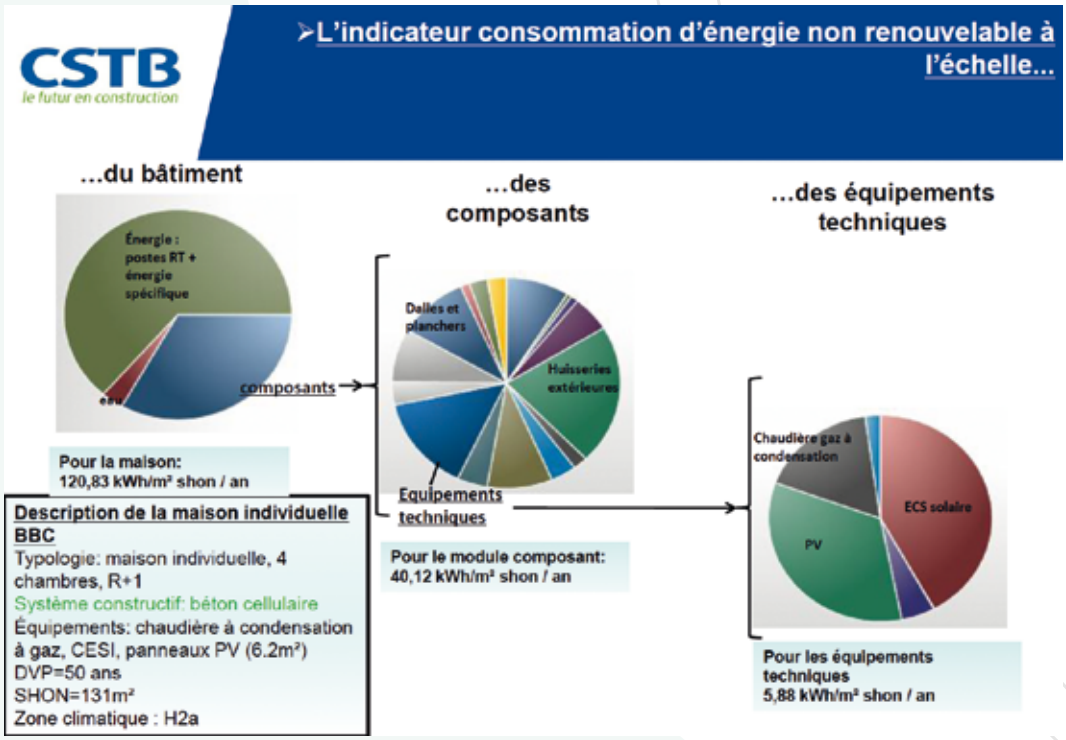


Figure 23 - Exemple de calcul des répartitions des consommations d'énergie non renouvelable – CSTB, Division Environnement – Assises nationales de l'énergie grise, 15 avril 2011

16 - 20 maisons individuelles, 20 immeubles de logements, 23 bâtiments de bureau, 8 bâtiments d'enseignement ou de recherche, 6 autres

Bureau d'étude ENERTECH – Répartition de l'énergie grise par lots

Répartition de l'énergie grise selon les différents lots de la construction

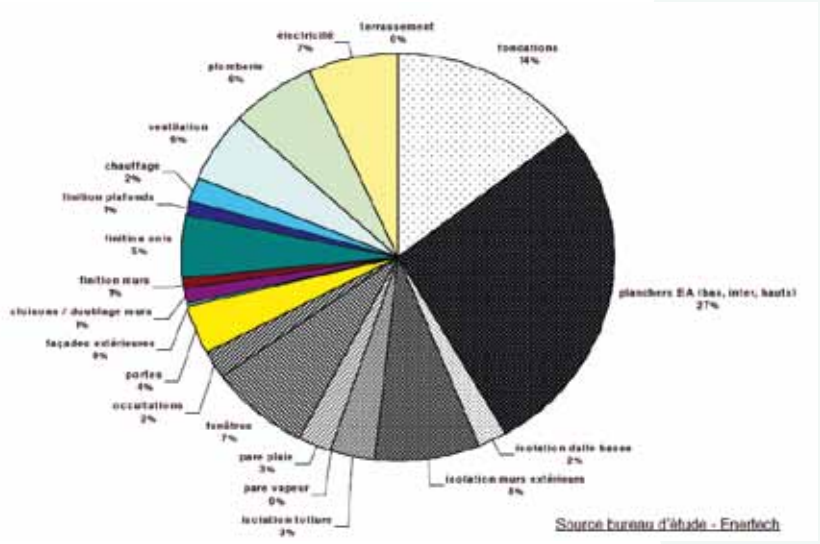


Figure 24 - Intégration de la question de l'énergie grise dans le bâtiment en région Bourgogne – ENERTECH, Région Bourgogne et ADEME – 18 mai 2010

Impact carbone de la construction d'une maison individuelle de 100 m² sur deux niveaux

Calcul des impacts carbone fait à partir des calculs d'énergie consommée.

Principes constructifs : mur en parpaing, isolation intérieure de base (polyplac), deux dalles en béton, une charpente en bois, de la volige (en bois).

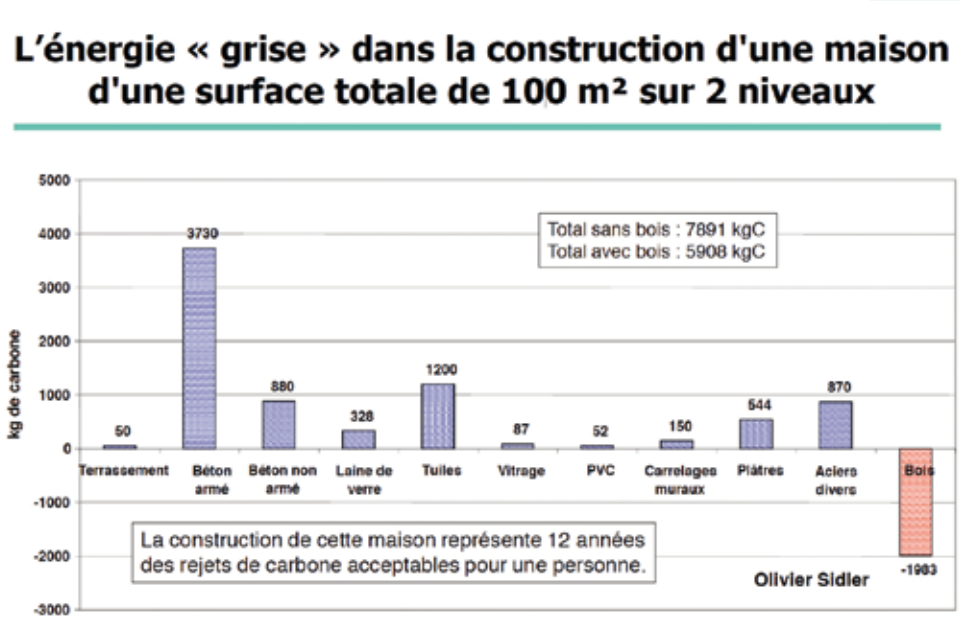


Figure 25 – Les émissions de gaz à effet de serre en équivalent carbone liées à la construction d'une maison individuelle – ENERTECH

Région Bourgogne – Appel à projet bâtiments à faible empreinte écologique

La Région Bourgogne a lancé un appel à projet en 2008-2009 sur les bâtiments à faible empreinte écologique avec, en complément d'exigences fortes sur la consommation d'énergie en exploitation, une exigence sur la consommation d'énergie grise : de 1200 à 1500 kWhep/m² selon les performances énergétiques visées pour les bâtiments. Elle poursuivait les objectifs suivants :

- réduire l'impact général du bâtiment : en phase conception et mise en œuvre (matières premières, pollutions…), en phase activité (santé…), en fin de vie (déconstruction, déchets…) ;
- simplifier le bâtiment ;
- faire évoluer les filières du bâtiment pour qu'elles soient moins impactantes (sans montrer qui que ce soit du doigt, ce qui n'empêche pas des choix politiques) ;
- faire émerger des filières nouvelles locales de matériaux naturels et écologiques (filières bois et agro matériaux…) ;
- impulser de nouvelles pratiques par le biais d'un outil d'aide à la décision (outil de calcul sur l'énergie grise en cours de développement) ;
- développer des bâtiments à faible empreinte écologique, à faible empreinte carbone et écologique par le biais d'un ECOPASS.

Rénovation label Passivhaus d'un immeuble de logements à Zurich ou démolition / reconstruction

La rénovation d'un immeuble de 1894 à Zurich, labellisé Passivhaus, par l'Agence Viriden & Partner, a été présentée dans la revue n°16 d'Ecologik[17], consacrée à la réhabilitation éco-responsable. Cet article présente quatre appartements, d'une surface totale de 327 m². L'étude réalisée permet de savoir s'il est plus judicieux de tout déconstruire pour reconstruire en neuf ou de réhabiliter l'ensemble.

Le tableau suivant présente la différence en termes de poids entre les matériaux réutilisés, démolis et évacués et neufs et ceci entre une déconstruction complète (soit en Passivhaus, soit au niveau réglementaire de consommation d'énergie) et une rénovation. Dans ce cas précis, il est donc plus judicieux de réhabiliter car la rénovation a permis un gain en énergie totale de 27 % par rapport à une destruction/reconstruction passive et de 60 % par rapport à une destruction/reconstruction au niveau réglementaire.

énergie grise (énergie procédé non renouvelable et énergie matière) **et énergie fonctionnement**	**Matériaux**			**TOTAL**
	réutilisés sur place (Tuiles de toit, portes rabotées et raccourcies, etc.)	**démolis et évacués**	**Neufs**	
Destruction/ reconstruction passive **112 kWh/m²/an**	0 tonne	970 tonnes	600 tonnes	**1 570 tonnes**
Destruction/ reconstruction niveau réglementaire **200 kWh/m²/an**				
Rénovation **82kWh/m²/an**	10 tonnes	43 tonnes = 4 % de la masse totale de l'immeuble	92 tonnes = 10 % de la masse totale de l'immeuble. Laine de roche, de 16 à 40 cm	**135 tonnes**

17 - « Rénovation label Passivhaus d'un immeuble de 1894 ». Ecologik Réhabilitation éco-responsable. N° 16. Août septembre 2010.

Cahier technique 2032 de la SIA – Immeuble de logements

Ce cahier technique, l'énergie grise des bâtiments, fait partie des normes de la SIA, Société des Ingénieurs et Architectes suisses. Il indique que « l'énergie grise (énergie procédé d'origine non renouvelable) investie dans un nouveau bâtiment sous forme de matériaux de construction et d'installations est généralement comprise – rapportée à la durée d'utilisation – entre 80 et 100 MJ par m^2 de surface plancher et par an. » Soit, entre 22 et 28 $kWh/m^2_{ASP}.an$.

Il donne aussi, dans l'annexe E, l'exemple d'un calcul d'énergie grise pour un bâtiment de logement de 7 étages avec un sous-sol. Il s'agit d'une construction mixte constituée de dalles et de parois intérieures massives avec une structure légère porteuse et isolante en bois pour les façades avec un habillage ventilé. Le bâtiment est très compact avec un rapport surface d'enveloppe/surface de référence énergétique de 0,95.

Les résultats sont les suivants :

> énergie grise ramenée à l'année : 24,7 $kWh/m^2_{ASP}.an$ (26,3 $kWh/m^2A_E.an$). Cette valeur relativement faible est dû au volume important et compact du bâtiment ;

> part de la construction : 92 %, de l'élimination : 8 % ;

> part relative des différents composants :

- structure porteuse : 22 %. La construction mixte choisie, le système porteur simple avec des portées raisonnables et la répartition linéaire de la charge ont des effets positifs sur le résultat,
- enveloppe (dalles de fond, parois extérieures souterraines et hors terrain, toiture, fenêtres) : 35 %. Fenêtres et portes représentent à peu près autant d'énergie que les parois extérieures hors terrain (respectivement 12 % et 11 %),
- excavations et fondations : 5 %. Ce pourcentage faible s'explique par la répartition de ce poste sur 7 étages,
- installations techniques du bâtiment (production et fourniture de chaleur, installations de ventilation, sanitaires et électriques) : 23 %,
- aménagements intérieurs : 15 %.

Ville de Lausanne – Quartier des Plaines-du-Loup

La ville de Lausanne[18] a fait un calcul de besoin en énergie grise (énergie primaire non renouvelable) pour le quartier durable des Plaines-du-Loup (moyenne de durée de vie de 80 ans) :

> parkings enterrés de 30 m^2 par place en structure traditionnelle (béton armé, isolation imputrescible et étanchéité classique) : 10 $MJ/m^2A_E.an$ (7 pour la construction, 2 pour le remplacement et 1 pour l'élimination), soit 2,8 $kWh/m^2.an$;

> locaux de services (buanderies, caves, locaux vélos, locaux techniques…) en structure traditionnelle : 8 $MJ/m^2A_E.an$ (7 pour la construction, 2 pour le remplacement et 1 pour l'élimination), soit 2,2 $kWh/m^2.an$;

> systèmes techniques (chaufferies, réseaux hydrauliques, sanitaires ou électriques, etc.) : valeur forfaitaire de 10 $MJ/m^2A_E.an$, soit 2,8 $kWh/m^2.an$;

> Bâtiments :

- un peu plus de 100 $MJ/m^2A_E.an$ à 150 $MJ/m^2A_E.an$ (de 28 à 42 $kWh/m^2A_E.an$), selon la forme et le nombre d'étages avec un optimum correspondant systématiquement au niveau pour lequel le facteur de forme est le plus petit. Cet optimum varie en fonction de la taille du bâtiment. Par exemple, l'énergie grise consommée par un bâtiment cubique de 2 000 m^2 est minimale lorsque celui-ci est organisé en 5 niveaux (Ath^{19}/A_E = 1). A contrario, pour un bâtiment de 5 000 m^2 cet optimum s'observe lorsque le volume est distribué en 7 niveaux (Ath/A_E = 0,73). Le mode constructif est traditionnel,
- de 85 $MJ/m^2A_E.an$ à 190 $MJ/m^2A_E.an$ (de 24 à 53 $kWh/m^2A_E.an$), selon le nombre de

18 - Ville de Lausanne – Service du logement et des gérances - Projet métamorphose - Concept énergétique pour le quartier durable des Plaines-du-Loup - Version 1 - édition mars 2010

19 - Ath = surface d'enveloppe, AE = surface de référence énergétique

niveaux et le mode constructif. L'écart entre un mode constructif préfabriqué (façades préfabriquées en béton armé, parement extérieur en béton, isolation périphérique en polyuréthane et cadres de vitrages en aluminium et un mode constructif bois (structure en ossature bois, isolation en laine minérale et cadres de vitrages en bois. Dalles mixtes bois/béton) est d'environ 35 MJ/m^2A_E.an pour une surface et un nombre de niveaux égaux,

- la variation d'énergie grise entre une construction réglementaire et une construction au standard Passivhaus correspond à une augmentation des besoins en énergie grise de 8 %.

L'objectif visé pour le quartier est la « Société 2000 Watts », ce qui se traduit par une allocation en énergie grise de 100 MJ/m^2A_E.an pour les bâtiments neufs logements ou bureaux, soit 27,8 kWh/m^2A_E.an et 2 224 kWh/m^2A_E sur les 80 ans de durée de vie de ces bâtiments.

Étude américaine : the greenest building : Quantifying the environmental value of building reuse[20]

Cette étude évalue les impacts environnementaux d'une construction neuve et d'une réhabilitation pour différents types de bâtiments dans 4 villes des États-Unis aux climats très différents. 4 impacts sont calculés pour une durée de vie de 75 ans : changement climatique, consommation de ressources, santé humaine, qualité des écosystèmes. Pour la réhabilitation et la construction neuve, les impacts sont calculés pour deux niveaux de performance énergétique : le niveau standard (base case) et une performance de 30 % meilleure que le niveau standard (advanced case).

Analyse des résultats de l'étude pour l'impact sur le changement climatique :

> la réhabilitation a un bilan global d'émission de gaz à effet de serre (travaux + vie en œuvre) meilleur que la construction neuve de 7 à 25 % ;

> une construction neuve avec des performances thermiques améliorées de 30 % par rapport à la moyenne de sa catégorie a un temps de retour en termes d'émissions de gaz à effet de serre de 10 à 80 ans par rapport à une réhabilitation à performance énergétique standard ;

> le fait d'augmenter le niveau de performance énergétique a un impact très faible sur le bilan carbone de la construction ou de la réhabilitation par rapport à la diminution des émissions de gaz à effet de serre pendant la vie en œuvre.

Le graphique ci-dessous montre la différence de bilan global d'émissions de gaz à effet de serre pour des écoles entre une construction neuve (barres grises) et une réhabilitation (barres colorées) pour des villes avec des climats différents. La comparaison est faite pour une construction neuve à performance énergétique standard ou avancée. Dans tous les cas, le bilan global de la réhabilitation est meilleur d'au moins 7 %.

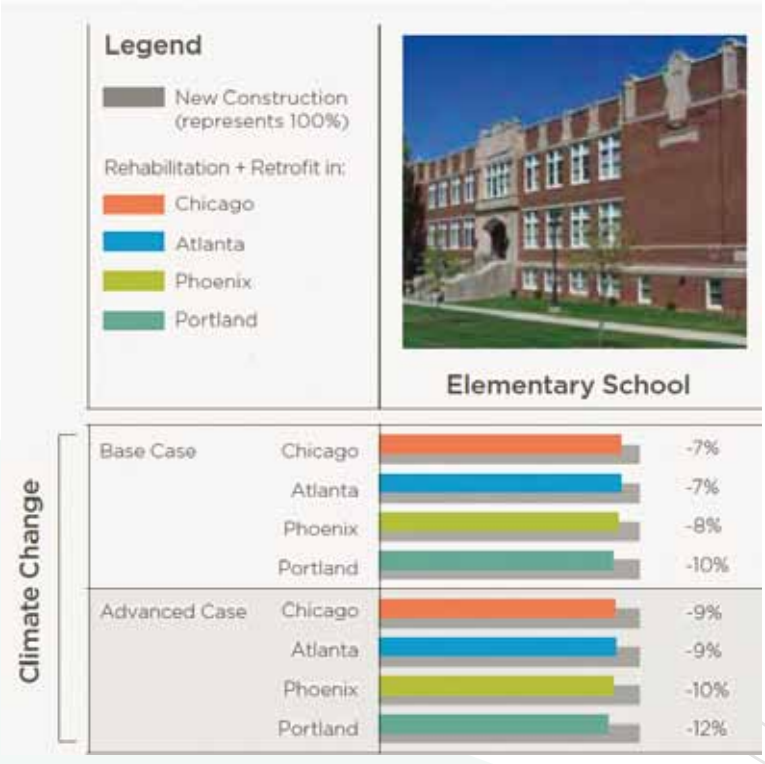


Figure 26 - the greenest building : émissions de gaz à effet de serre comparées entre réhabilitation et construction neuve pour des écoles

20 - The greenest building : Quantifying the environmental value of building reuse – A report by Preservation Green Lab - www.preservationnation.org/issues/sustainability/green-lab/ -

Le graphique ci-après montre les temps de retour en émission de gaz à effet de serre de constructions neuves avec des performances thermiques améliorées de 30 % par rapport à la moyenne de leur catégorie par rapport à des réhabilitations à performance énergétique standard. Cette comparaison est faite pour deux types de climat : Chicago et Portland et plusieurs types de bâtiments.

Year Of Carbon Equivalency For Existing Building Reuse Versus New Construction

This study finds that it takes between 10 to 80 years for a new building that is 30 percent more efficient than an average-performing existing building to overcome, through efficient operations, the negative climate change impacts related to the construction process. This table illustrates the numbers of years required for new, energy efficient new buildings to overcome impacts.

Building Type	Chicago	Portland
Urban Village Mixed Use	42 years	80 years
Single-Family Residential	38 years	50 years
Commercial Office	25 years	42 years
Warehouse-to-Office Conversion	12 years	19 years
Multifamily Residential	16 years	20 years
Elementary School	10 years	16 years
Warehouse-to-Residential Conversion*	Never	Never

*The warehouse-to-multifamily conversion (which operates at an average level of efficiency) does not offer a climate change impact savings compared to new construction that is 30 percent more efficient. These results are driven by the amount and kind of materials used in this particular building conversion. As evidenced by the study's summary of results, as shown on page VII, the warehouse-to-residential conversion does offer a climate change advantage when energy performance for the new and existing building scenarios are assumed to be the same. This suggests that it may be especially important to retrofit warehouse buildings for improved energy performance, and that care should be taken to select materials that will maximize environmental savings.

Figure 27 - the greenest building - Temps de retour en émissions de GES de la construction neuve avec des performances énergétiques améliorées de 30 % par rapport à la moyenne par rapport à la réhabilitation avec des performances énergétiques standard

Climate Change Impacts for Commercial Office

Enfin, le dernier graphique montre les poids relatifs des différentes phases du cycle de vie d'un bâtiment de commerce en construction neuve (NC) ou réhabilitation (RR) pour 4 villes aux climats différents. La part liée à la construction (en bleu dans le graphique) varie très peu entre un bâtiment à performance énergétique standard et un bâtiment à performance énergétique améliorée de 30 % mais elle est sensiblement plus faible pour la réhabilitation.

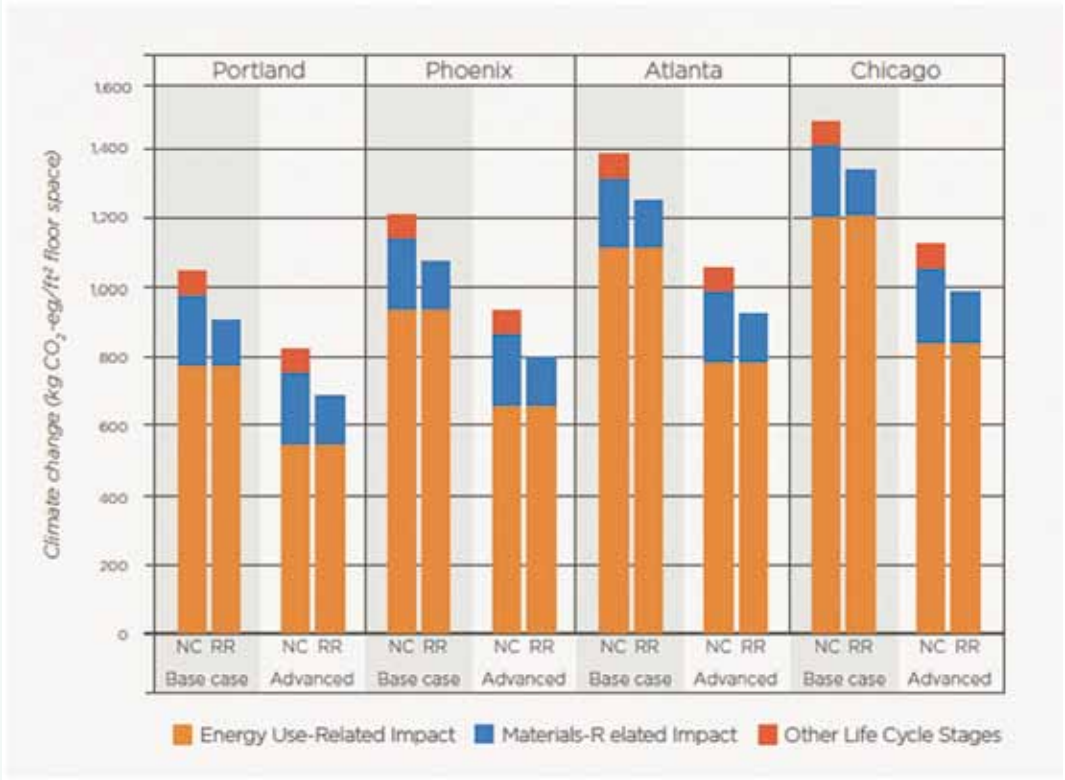


Figure 28 – The greenest building – Comparaison des émissions de gaz à effet de serre globales entre un bâtiment à performance énergétique standard et un bâtiment 30 % plus performant pour la construction neuve (NC) et la réhabilitation (RR)

Énergie grise d'un aménagement de point de vente

Étude réalisée par Be Citizen pour la Shop Expert Valley – L'éco-aménagement du point de vente – 2009

Modélisation d'un magasin type de 80 m². L'étude, réalisée avec l'outil d'analyse de cycle de vie simplifié, Bilan Produit de l'ADEME et la base de données Ecoinvent 2.0, intègre les composants de l'aménagement suivants : coque intérieure, signalétique extérieure et intérieure (statique et dynamique), mobilier.

On constate que la plus grande part d'énergie primaire non renouvelable est liée aux aménagements et revêtements intérieurs, en particulier au plâtre et au carrelage. Comme la durée de vie de ces aménagements est faible (de 5 à 7 ans), il est indispensable pour diminuer leur énergie grise de réfléchir à la réutilisation d'éléments existants, au recyclage en fin de vie, à l'utilisation de matériaux avec une durée de vie cohérente, aux alternatives au plâtre et carrelages.

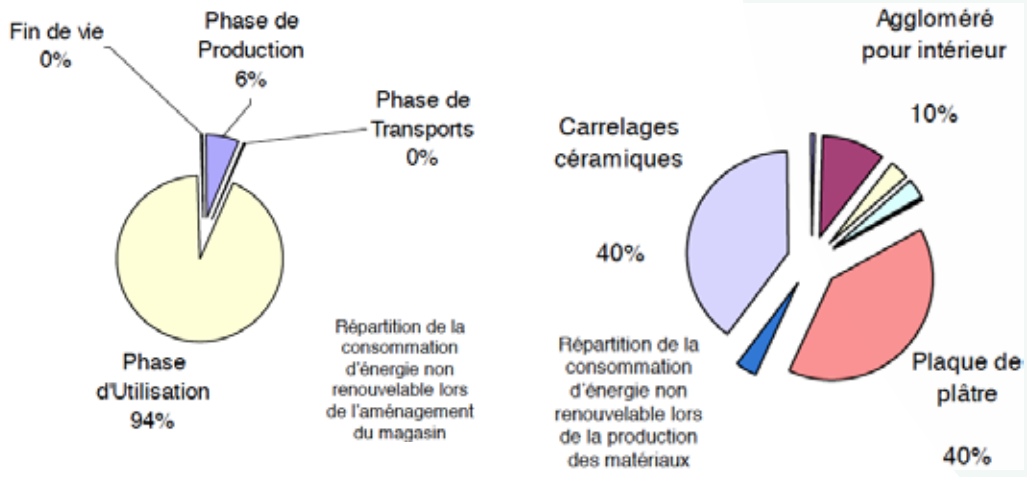


Figure 29 - Énergie grise de l'aménagement d'un point de vente - Be Citizen pour la Shop Expert Valley - 2009

5.3 – Synthèse et ordres de grandeur

Cette synthèse est élaborée à partir des calculs des membres du GT et des autres exemples ci-dessus issus de la recherche bibliographique.

Valeur absolue de l'énergie primaire

> Calculs du groupe de travail : 1 500 à 3 500 kWh/m² pour des bâtiments d'une durée de vie entre 50 et 80 ans :

- bâtiments d'une durée de vie de 80 ans : de 1 600 à 3 500 kWh/m²$_{SHON}$, soit ramené à une année, de 20 à 43 kWh/m²$_{SHON}$.an,
- bâtiments d'une durée de vie de 50 ans : de 1 500 à 1 800 kWh/m²$_{SHON}$, soit ramené à une année, de 30 à 36 kWh/m²$_{SHON}$.an ;

> Résultats des autres études et normes ;

- études : 23 à 75 kWh/m²$_{SHON}$.an avec des valeurs médianes légèrement au-dessus de 40 kWh/m²$_{SHON}$.an,
- SIA dans le CT 2032 : de 22 à 28 kWh/m²$_{ASP}$.an.

POINTS À RETENIR

Ordres de grandeur de l'énergie grise d'un bâtiment selon l'échelle de temps

Ensemble des bâtiments :
- énergie grise sur toute la durée de vie = de 1 500 à 3 500 kWh/m²$_{SHON}$,
- énergie grise ramenée à l'année = de 20 à 75 kWh/m²$_{SHON}$.an ;

Bâtiments optimisés :
- énergie grise toute la durée de vie = de 1 200 à 2 200 kWh/m²$_{SHON}$,
- énergie grise ramenée à l'année = de 20 à 30 kWh/m²$_{SHON}$.an.

Valeur relative par rapport à une consommation en exploitation de bâtiment BBC (50 kWh/m²$_{SHON}$.an pour les usages réglementaires uniquement)

> Pour les bâtiments d'une durée de vie de 80 ans : de 30 à 50 ans de consommation annuelle en phase exploitation.

> Pour les bâtiments d'une durée de vie de 50 ans : plutôt vers les 30 à 35 ans de consommation annuelle en phase exploitation.

L'énergie grise d'un bâtiment de 80 ans est plus élevée car, même si on amortit plus la structure, on renouvelle plus d'éléments qu'en 50 ans (exemples : carrelages, faux plafonds, isolants, revêtements de façades, baies vitrées…), ce qui s'assimile à une réhabilitation lourde.

POINTS À RETENIR

Équivalent énergie grise en années de consommations d'énergies pour l'exploitation d'un bâtiment BBC 2005

Énergie grise en années de consommation d'énergie en exploitation d'un bâtiment BBC 2005 = de 30 à 50 ans

Poids relatifs des différents lots de l'ouvrage dans l'énergie grise

Poids des équipements dans le total :

> Outil TRIBU : vers les 200 kWh/m² sur l'ensemble de la durée de vie. Explication : utilisation de ratios (25 000 kWh/tonne pour les conduits/tuyauteries et 27 000 kWh/tonne pour les équipements). Seul le projet MHE est à 500 kWh/m² car ce poste a été beaucoup plus détaillé dans le calcul. Ratio à retenir : environ 10 à 15 % de l'énergie grise totale et environ 4 kWh/ m²$_{SHON}$.an ;

> CSTB : 40,12 kWh/m²$_{SHON}$.an pour une maison individuelle BBC RT 2005 d'une durée de vie de 50 ans. Part des équipements : 5,88 kWh/m².an soit 15 % ;

> Bureau d'études Enertech : ratio de 20 % pour les équipements (calcul effectué pour la région Bourgogne) ;

> Ville de Lausanne : valeur forfaitaire de 10 MJ/m²A_E.an, soit 2,8 kWh/m².an, soit 10 % de l'énergie grise allouée à un bâtiment ;

> SIA dans le CT 2032 :
- dans le tableau de calcul de l'annexe D : 28 MJ/m²A_E.an, soit 8 kWh/m²A_E.an,
- 23 % pour un immeuble de logements de 7 étages.

POINTS À RETENIR

Poids des équipements

de 3 à 8 kWh/ m²$_{SHON}$ .an, soit 10 à 25 % du total de l'énergie grise

Poids de la structure :

- autour des 300 kWh/m²$_{SHON}$ pour les réhabilitations, les bâtiments sans infrastructure ou avec d'autres matériaux que le béton ;
- de 500 à 900 kWh/m²$_{SHON}$ pour les constructions lourdes béton et charpente métallique ;
- ville de Lausanne : parkings enterrés de 30 m² par place en structure traditionnelle (béton armé, isolation imputrescible et étanchéité classique) : 225 kWh/m²A_E ;
- SIA dans le CT 2032 : 22 % pour un immeuble de logements de 7 étages.

Poids de l'enveloppe :

- Entre 300 et 1 300 kWh/m²$_{SHON}$;
- SIA dans le CT 2032 : 35 % pour un immeuble de logements de 7 étages.

Poids de l'aménagement intérieur

- entre 170 et 730 kWh/m²$_{SHON}$;
- SIA dans le CT 2032 : 15 % pour un immeuble de logements de 7 étages.

Il n'est pas possible, à partir des études réalisées, de déterminer une part en pourcentage de ces 3 grandes composants du bâtiment, sauf dans le cas des collèges étudiés par Le Sommer Environnement, car les bâtiment sont de même type, de même durée de vie, de modes de construction similaires et les calculs ont été fait avec le même outil. Dans ce cas, la répartition entre les 3 est d'environ :

- poids de la structure : 30 à 42 % ;
- poids de l'enveloppe : 30 à 47 % ;
- poids des aménagements intérieurs : 18 à 30 %.

Soit des poids sensiblement équivalents pour la structure et l'enveloppe et un poids en moyenne deux fois plus faible pour les aménagements intérieurs.

Poids du surinvestissement en énergie grise pour diminuer les consommations d'énergie en exploitation

- Construction de l'école du centre à Pantin : différence de 457 kWh/m² entre le bâtiment construit (énergie positive) et le même bâtiment conçu pour respecter la RT 2005, soit une augmentation de 13 %. Le retour sur investissement énergétique est de 1,4 année ;

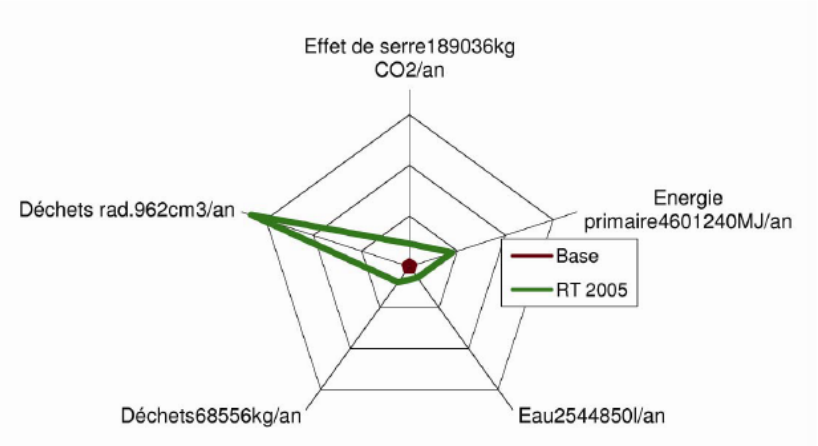


Figure 30 – Impacts comparés du projet à énergie positive (base) et de la même opération respectant uniquement la RT 2005 - Ville de Pantin – Construction de l'école du centre – Simulation de l'impact environnemental – MÉANDRE – Juillet 2008

- SSLIA de Roissy (remise, base vie et vigie occupés 24 h/24) : différence de 89 kWh/m².an entre le bâtiment RT 2005 (159 kWh/m²) et le bâtiment BEPAS (70 kWh/m²) pour les consommations en exploitation. Le bâtiment BEPAS a une énergie grise de + 5 kWh/m².an (31 kWh/m²) par rapport au même bâtiment RT 2005 (26 kWh/m²), soit une augmentation de 20 %. Le temps de retour sur investissement énergétique est d'environ 6 mois. Les calculs ont été réalisés avec le logiciel Cocon ;
- Ville de Lausanne : la variation d'énergie grise entre une construction réglementaire et une construction au standard Passivhaus correspond à une augmentation des besoins en énergie grise de 8 %.

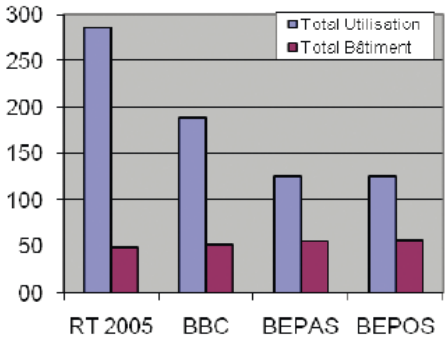


Figure 31 - Comparaison en énergie primaire totale (kWhep/m².an) sur une durée de vie de 30 ans du même bâtiment, SSLIA de Roissy avec des performances énergétiques différentes - Source : Évaluation des Impacts Environnementaux des Bâtiments Au niveau Structure et Matériaux – Rapport de stage Hélène Leh - ADP / INP ENSEEIHT – Septembre 2010

POINTS À RETENIR

Rapport entre investissement en énergie grise et consommations en exploitation

Le surinvestissement en énergie grise pour diminuer les consommations en énergie de la phase exploitation est négligeable par rapport aux gains en consommation d'énergie sur la durée de vie du bâtiment (temps de retour sur investissement énergétique de l'ordre de l'année pour une construction neuve).

Par contre, l'énergie grise est consommée pour la construction du bâtiment, c'est-à-dire pendant la ou les deux premières années de vie, alors que l'énergie d'exploitation est lissée sur les 50 années de durée de vie, ce qui permet de différer les impacts sur l'environnement.

Comparaison entre énergie grise des constructions neuves et de la réhabilitation

Une réhabilitation est bien moins consommatrice en énergie grise qu'une construction neuve.

Pour espérer obtenir un bilan total énergie grise + énergie exploitation plus faible en construction neuve qu'en réhabilitation, il faut optimiser fortement le niveau énergétique en phase exploitation du bâtiment neuf (niveau passif voire positif).

Moyens de comparaison

Plusieurs bâtiments peuvent être comparés entre eux uniquement si leur calcul d'énergie grise provient :

- des mêmes outils de calcul ;

- des mêmes bases de données.

En revanche, plusieurs bases de données peuvent servir à comparer entre eux des produits ou matériaux (avec la réserve nécessaire sur le périmètre pris en compte/les hypothèses/les définitions utilisés dans chaque base de données).

Centre d'exploitation d'autocars et d'autobus pour TRANSDEV à Bailly-Romainvilliers - Architecte NEX – AMO HQE : AILTER – Photo : Bruno Plasse

6. Comment quantifier l'énergie grise ?

6.1 – Les bases de données

La question : Quelle base de données utiliser ?

Pour quantifier l'énergie grise d'un bâtiment, il faut quantifier l'énergie grise contenue dans chacun de ses constituants. Les maîtres d'ouvrages et concepteurs ont à leur disposition une multitude de bases de données qui regroupent des résultats d'ACV très variables.

L'exemple ci-dessous illustre bien la difficulté pour nous, concepteurs ou prescripteurs, de comprendre et exploiter les résultats des calculs en énergie grise.

Le tableau ci-après répond à une question posée dans un concours de maîtrise d'œuvre : quel type de revêtement de façade choisir avec une isolation par l'extérieur et des caractéristiques données de durabilité, facilité d'entretien, résistance et faible énergie grise ? Une première recherche a été effectuée à partir de l'éco-devis 343 (réalisé à partir de la base de données Ecoinvent). Il donne des fourchettes de valeur d'énergie grise pour différents types de bardage (barres verticales du graphique ci-dessous). Il en ressort que, pour l'opération, les bardages les plus intéressants étaient en bois ou à base de minéraux (hors verre). Une deuxième recherche a ensuite été effectuée à partir des FDES de la base de données INIES sur les types de bardages les plus pertinents

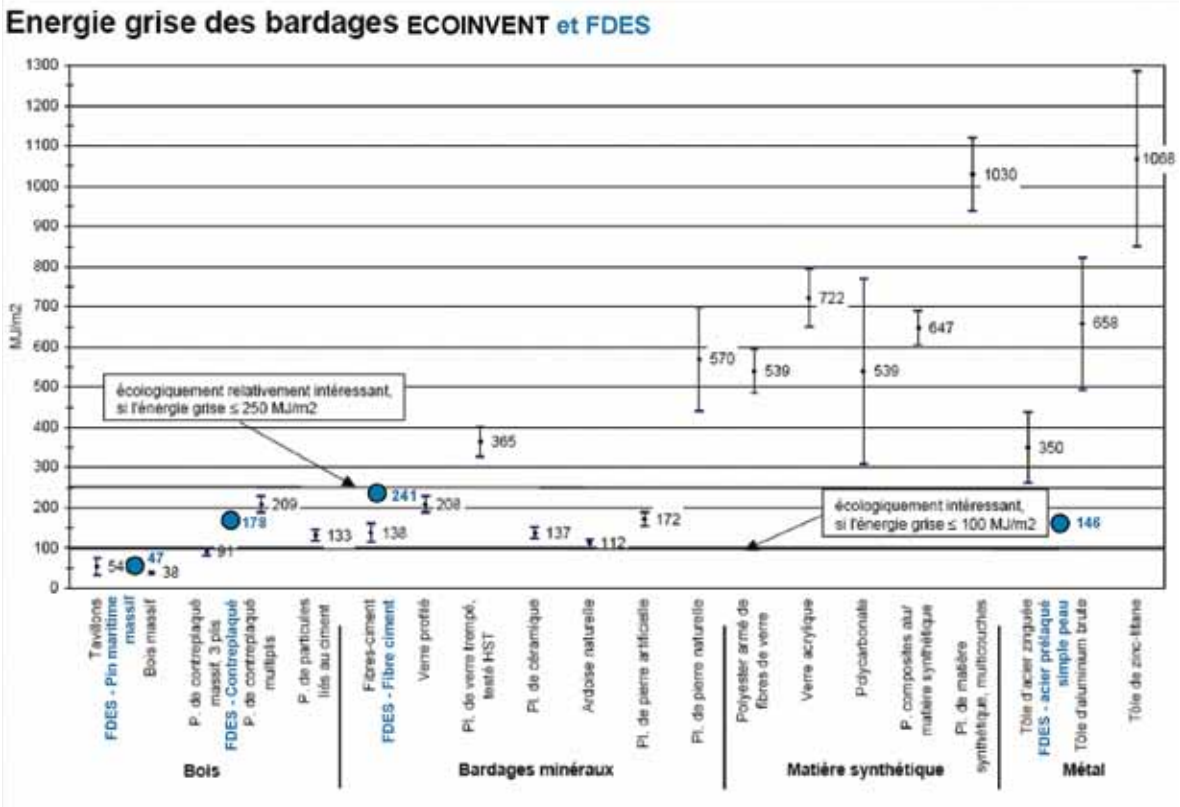


Figure 32 - Énergie grise des bardages - Source : éco-devis 343 édité par l'association de soutien eco-devis - juin 2008 complété par AILTER avec des valeurs issues des FDES

sur les autres critères. Les données des FDES utilisées sont celles de l'énergie primaire non renouvelable convertie en MJ (points bleus du graphique ci-dessus).

On constate alors que si les ordres de grandeur restent les mêmes pour le bois, les FDES comptent 2 fois plus d'énergie grise par rapport à l'éco-devis pour les plaques de fibres ciment et 3 fois moins pour l'acier. Du coup, si avec l'éco-devis la plaque de fibre ciment est plus performante que l'acier, avec les FDES c'est l'inverse.

Cet exemple, parmi d'autres, nous confirme que les modes de calculs et périmètres entre base de données sont différents et que deux bases de données ne peuvent pas donner les mêmes résultats.

Notre question : quelle base de données utiliser pour calculer l'énergie grise selon la définition de l'ICEB, pour quel type de résultats et à quel stade d'un projet ?

Qu'est-ce qu'une bonne base de données ?

Une base de données est un ensemble structuré et organisé permettant le stockage de grandes quantités d'informations afin d'en faciliter l'exploitation (ajout, mise à jour, recherche de données). Outre la quantité de produits couverts, une base de données de qualité se caractérise par la **transparence des résultats** fournis à l'utilisateur.

Dans l'analyse des résultats fournis par les bases de données pour l'énergie grise, on fera attention en priorité à :

> la définition de l'énergie grise ;

> la définition des hypothèses et du périmètre d'étude ;

> la fiabilité des données-sources employées (origine et vérification/mise à jour).

Les différents types de base de données

Dans le domaine de l'énergie grise et des ACV, on distingue deux types de bases de données :

> Les bases de données « source »

Elles recensent une grande quantité d'Analyses de Cycle de Vie (ACV) et d'Inventaires de Cycle de Vie (ICV), dans plusieurs domaines (bâtiment, énergie, industrie…). Les bases de données les plus importantes sont : LCI, GaBi, Ecoinvent.

Les calculs d'ACV sont réalisés par des fabricants ou des éditeurs de logiciels et/ou de base de données d'ACV. Les résultats des différents éditeurs constituent une base documentaire, pouvant être réutilisée par chacun d'entre eux. Par exemple, PE International peut utiliser les données de process d'Ecoinvent pour établir l'ACV d'un produit.

Ecoinvent, base de données suisse, est la plus utilisée dans le monde (2500 usagers) et la plus importante base de données d'inventaire tota-

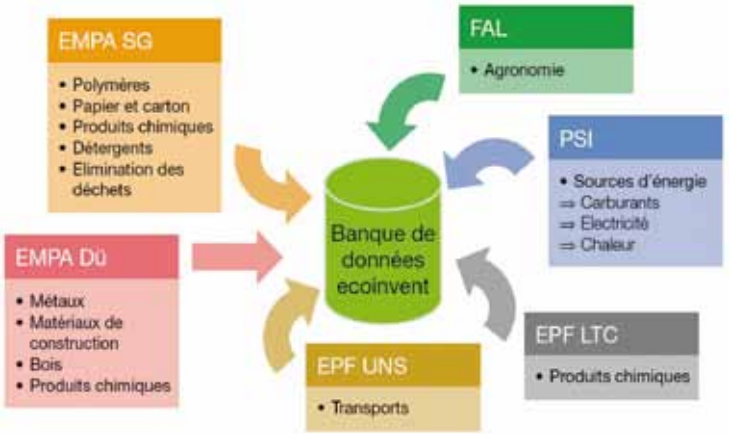


Figure 33 : Les données d'inventaires écologiques des différents départements sont réunies dans la banque de données centrale « Ecoinvent ». Source : Empa. Recherche sur les matériaux et technologie dans le domaine des EPF. Rapport annuel 2003

lisant 4 000 ACV de produits/procédés/services dans la plupart des secteurs d'activités. Ses données proviennent des industriels et instituts nationaux et internationaux. Ses résultats sont vérifiés et quotidiennement mis à jour par une équipe interne selon une méthode standardisée en 5 étapes conforme aux règles fédérales suisses (SIA CT 2032 - Énergie grise par exemple).

> Les bases de données dédiées au secteur de la construction.

Elles sont issues des bases de données source, dont les données sont directement exploitables pour le secteur du bâtiment. Parmi les principales bases de données utilisées en France et en Europe, sont INIES et KBOB.

Enfin, certains outils ont été créés pour constituer une interface entre le concepteur et la base de données et sont de réels outils de conception. Ces outils de calcul de l'énergie grise des bâtiments sont présentés au chapitre 6.2.

Les principales bases de données pour la construction

KBOB

Nom de la base de données : KBOB, données des éco-bilans dans la construction.

Nom de l'éditeur : KBOB, www.kbob.ch

Données sources : Base de données Ecoinvent

Données extraites : « Données des éco-bilans dans la construction ». Mise à jour régulière (prochaine parution fin 2012).

Site Internet : KBOB : http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/index.html?lang=fr ou Eco-bau : http://www.eco-bau.ch/index.cfm?Nav=20.

Pour créer la base de données matériaux, l'EMPA a mis en forme des données Ecoinvent au nom de KBOB (Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrages publics), de eco-bau (Durabilité et constructions publiques) et de CIMP (Communauté d'intérêt des maîtres d'ouvrage professionnels privés) et les a publié dans la recommandation Données des éco-bilans dans la construction 2009/1.

La définition de l'énergie grise des matériaux est, selon le cahier technique CT 2032 du SIA : « la quantité d'énergie primaire non renouvelable nécessaire pour tous les processus en amont, depuis l'extraction des matières premières jusqu'aux procédés de fabrication et de transformation, et pour l'élimination, y compris les transports et les moyens auxiliaires nécessaires à cet effet. » L'énergie non renouvelable indique l'énergie cumulée de la consommation énergétique fossile et nucléaire ainsi que le bois issu du déboisement de forêts primaires. Ne sont pas inclus dans le calcul, le transport à partir de l'usine, l'installation sur chantier et l'entretien pendant l'utilisation. Pour un élément de construction, l'énergie grise est calculée :

- sur la durée d'amortissement définie dans l'annexe C du CT 2032,
- par unité quantitative (par kg, m²…),
- en MJ.

OB / eco-bau / IPB 2009/1 — Données des écobilans dans la construction — Etat de janvier 2011

Entsorgung Elimination	Primärenergie Energie primaire gesamt globale Total total MJ	Herstellung Fabrication MJ	Entsorgung Elimination MJ	nicht erneuerbar non renouvelable Total total MJ	Herstellung Fabrication MJ	Entsorgung Elimination MJ	Treibhausgasemissionen Emissions de gaz à effet de serre Total total kg	Herstellung Fabrication kg	Entsorgung Elimination kg	Référence / Dimension	MATÉRIAUX [Bibliographie EMPA, version 2.2]
											Béton (sans armature)
23.8	0.544	0.366	0.178	0.517	0.345	0.172	0.0646	0.0557	0.00890	Masse	Béton C 8/10 (béton maigre)
25.8	0.721	0.519	0.202	0.680	0.484	0.196	0.0775	0.0670	0.0105	Masse	Béton C 25/30 spécialement pour fondations / dalles
25.8	0.811	0.609	0.202	0.771	0.575	0.196	0.120	0.110	0.0105	Masse	Béton C 30/37
25.8	0.933	0.730	0.202	0.887	0.691	0.196	0.144	0.133	0.0105	Masse	Béton C 50/60 (pour charge élevée)

Énergie grise non renouvelable $_{ICEB}$ = Énergie primaire non renouvelable $_{KBOB}$
Énergie grise renouvelable $_{ICEB}$ = Énergie primaire totale $_{KBOB}$ - Énergie primaire non renouvelable $_{KBOB}$

Figure 34 – KBOB – Données des éco-bilans dans la construction – Janvier 2011 : Extrait

Les données sur les matériaux correspondent aux technologies clés dans la chaine de production et au lieu d'approvisionnement. Le marché des matériaux de construction en Suisse sert de référence. Le besoin en énergie primaire d'électricité correspond au mix entre production intérieure suisse et importations en provenance des pays voisins.

Dans la base de données, dont un extrait est montré ci-après, on trouve pour chaque matériau et par unité, l'énergie primaire totale (procédé) et l'énergie primaire (procédé) non renouvelable (l'énergie grise) ainsi que la décomposition entre l'énergie de fabrication et l'énergie d'élimination.

La plate-forme distingue quatre domaines : matériaux de construction, techniques de construction, énergie et transport. Elle recense une centaine de matériaux et une trentaine d'équipements.

Gratuite, sa prise en main est aisée (format pdf ou Excel, lecture immédiate) et un exemple est illustré pour chacune des 4 sections (ex : béton pour les matériaux).

Pour calculer l'énergie grise d'une unité fonctionnelle, il faut pour chaque matériau qui la compose, calculer la quantité nécessaire, puis l'énergie grise correspondant à cette quantité et, si la durée d'amortissement de ce matériau est inférieure à celle de l'unité fonctionnelle, la multiplier par le nombre de remplacements plus 1 et ensuite additionner toutes ces énergies grises.

INIES

Nom de la base de données : INIES.
http://www.inies.fr/
Nom de l'éditeur : CSTB. http://www.cstb.fr/
Données sources : fabricants ou groupements de fabricants
Données extraites : FDES, Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire.
Site Internet :
http://www.inies.fr/IniesConsultation.aspx
INIES est une base de données française regroupant les Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires, FDES, des produits de construction. Leur contenu et leur format sont définis par la Norme NF P01-010. Les FDES sont fournies par des fabricants ou des syndicats professionnels et peuvent être vérifiées par une tierce partie, mais cette vérification n'est actuellement pas systématique. La base INIES comportait environ 785 FDES début 2012 dont 21 % ont été validées par une tierce partie.

L'analyse du cycle de vie qui sert de base aux FDES intègre 5 étapes : production, transport usine-chantier, mise en œuvre, vie en œuvre (entretien / maintenance / remplacement) et fin de vie.

Une FDES décrit obligatoirement l'unité fonctionnelle, la durée de vie typique et les éventuels produits complémentaires de mise en œuvre.

Les résultats sont données pour la durée de vie typique (DVT) et/ou par annuité. Ils sont constitués des résultats d'inventaire de cycle de vie détaillés d'une part, et des 10 indicateurs environnementaux définis par la norme NF P01-010 d'autre part.

N°	Impact environnemental	Unité
1	**Consommation de ressources énergétiques** - Energie primaire totale - Energie renouvelable - Energie non renouvelable	MJ/UF
2	**Epuisement de ressources (ADP)**	kg équiv. Antimoine (Sb) / UF
3	**Consommation d'eau totale**	Litre/UF
4	**Déchets solides** - Déchets valorisés (total) - Déchets éliminés : - Déchets dangereux - Déchets non dangereux - Déchets inertes - Déchets radioactifs	kg/UF
5	**Changement climatique**	kg équiv. CO2/UF
6	**Acidification atmosphérique**	kg équiv. SO2/UF
7	**Pollution de l'air**	m3/UF
8	**Pollution de l'eau**	m3/UF
9	**Destruction de la couche d'ozone stratosphérique**	kg CFC équiv. R11/UF
10	**Formation d'ozone photochimique**	kg équiv. éthylène/UF

Figure 35 - Tableau des indicateurs environnementaux d'une FDES.

Gratuite, la prise en main de son interface dynamique est rapide (10 mn) et intuitive.

L'organisation d'une FDES respecte un cadre commun à toutes les FDES : voir exemple de sommaire figure 36 ci-contre.

L'énergie grise au sens de la définition de l'ICEB n'est pas identifiable dans les FDES, que ce soit l'énergie d'origine non renouvelable ou non renouvelable. On peut identifier l'énergie procédé totale (non renouvelable ET renouvelable) si l'on

dispose de la FDES complète et pas seulement de la FDES simplifiée avec les résultats des 10 impacts. Pour trouver l'énergie procédé totale hors vie en œuvre, il faut consulter le chapitre 2.1 Consommation des ressources naturelles qui comporte un tableau détaillant les consommations d'énergie par nature et par phase du cycle de vie (voir figure 37).

PLAN

INTRODUCTION 3

GUIDE DE LECTURE 4

1. CARACTERISATION DU PRODUIT SELON NF P01-010 § 4.3 5

1.1 Définition de l'Unité Fonctionnelle (UF) 5
1.2 Masses et données de base pour le calcul de l'unité fonctionnelle (UF) 5

2. DONNEES D'INVENTAIRE ET AUTRES DONNEES SELON NF P01-010 § 5 ET COMMENTAIRES RELATIFS AUX EFFETS ENVIRONNEMENTAUX ET SANITAIRES DU PRODUIT SELON NF P01-010 § 4.7.2 6

2.1 Consommation des ressources naturelles (NF P01-010 § 5.1) 6
2.2 Emissions dans l'air, l'eau et le sol (NF P01-010 § 5.2) 14
2.3 Production de déchets (NF P01-010 § 5.3) 20

3. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX REPRESENTATIFS DES PRODUITS DE CONSTRUCTION SELON NF P01-010 § 6 24

4. CONTRIBUTION DU PRODUIT A L'EVALUATION DES RISQUES SANITAIRES ET DE LA QUALITE DE VIE A L'INTERIEUR DU BATIMENT SELON NF P01-010 § 7 25

4.1 Informations utiles à l'évaluation des risques sanitaires (NF P01-010 § 7.2) 26
4.2 Contribution du produit au confort (NF P01-010 § 7.3) 26

5. AUTRES CONTRIBUTIONS DU PRODUIT NOTAMMENT PAR RAPPORT A DES PREOCCUPATIONS D'ECOGESTION DU BATIMENT, D'ECONOMIE ET DE POLITIQUE ENVIRONNEMENTALE GLOBALE 27

5.1 Ecogestion du bâtiment 27
5.2 Préoccupation économique 27
5.3 Politique environnementale globale 27

6. ANNEXE : CARATERISATION DES DONNEES POUR LE CALCUL DE L'INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE 28

6.1 Définition du système ACV 28
6.2 Sources de données 29
6.3 Traçabilité 30

7 A. ANNEXE : Flux de Inventaire de Cycle de Vie (ICV) pour la DVT de 15 ans 31

7 B. ANNEXE : Flux de Inventaire de Cycle de Vie (ICV) pour la DVT de 25 ans 41

Figure 36 – Sommaire d'une FDES

Nom du revêtement	Linoléum acoustique DVT20	
Masse (kg/m2)	3,013	Sim 146
Epaisseur (mm)	3,6	

Flux	Unités	Prod.	Transport	Mise en œuvre	Vie en Œuvre	Fin de vie	Total Cycle de Vie DVT pour un an	Total Cycle de Vie DVT pour DVT
Consommation de ressources énergétiques								
Bois (matière)								
Bois	kg	9,4E-02	1,2E-08	6,7E-06	1,1E-04	-9,3E-07	9,4E-02	1,9E+00
(r) Charbon	kg	3,0E-02	2,0E-06	1,3E-03	2,1E-02	-3,0E-04	5,2E-02	1,0E+00
(r) Lignite	kg	5,2E-04	1,1E-07	3,9E-06	2,8E-05	1,1E-06	5,5E-04	1,1E-02
(r) Gaz Naturel (matière)	kg							
(r) Gaz Naturel	kg	6,4E-02	5,1E-05	1,8E-03	1,2E-02	-1,1E-04	7,8E-02	1,6E+00
(r) Pétrole (matière)	kg							
(r) Pétrole	kg	2,4E-02	2,2E-03	2,8E-03	5,4E-03	-1,8E-04	3,4E-02	6,8E-01
(r) Uranium (U)	kg	4,0E-06		1,9E-08	1,3E-05	2,1E-08	1,7E-05	3,4E-04
Indicateurs énergétiques								
Energie Primaire Totale	MJ	1,0E+01	9,6E-02	1,9E-01	8,3E+00	-5,7E-03	1,9E+01	3,7E+02
Energie Renouvable	MJ	3,7E+00	3,7E-05	1,6E-03	4,1E-01	2,6E-04	4,1E+00	8,2E+01
Energie Non Renouvable	MJ	6,3E+00	9,6E-02	1,9E-01	7,9E+00	-6,0E-03	1,5E+01	2,9E+02
Energie Procédé	MJ	6,3E+00	9,6E-02	9,7E-02	8,2E+00	3,6E-02	1,5E+01	3,0E+02
Energie Matière	MJ	3,7E+00	3,3E-07	9,6E-02	9,4E-02	-4,2E-02	3,8E+00	7,7E+01
Electricité	kWh	3,4E-01	6,8E-05	2,7E-03	7,7E-01	1,7E-03	1,1E+00	2,2E+01
Consommation de ressources énergétiques : total	kg	2,1E-01	2,2E-03	5,9E-03	3,9E-02	-5,8E-04	2,6E-01	5,2E+00

Figure 37 - FDES du linoléum acoustique – Extrait du chapitre 2.1 détaillant les différents types de consommation d'énergie

Énergie grise selon définition ICEB :
Énergie procédé non renouvelable $_{ICEB}$ = Non identifiable dans la base INIES
Énergie procédé renouvelable $_{ICEB}$ = Non identifiable dans la base INIES
Donnée identifiable base INIES = Énergie procédé totale (non renouvelable et renouvelable) $_{ICEB}$
= [Énergie procédé totale]$_{INIES}$ – [Énergie procédé liée à la vie en œuvre]$_{INIES}$

Dans ce même chapitre, on trouve aussi une explication sur le périmètre de l'étude, notamment sur les modalités de comptage des consommations d'énergie (voir figure ci-dessous).

2.1.1 Consommation de ressources naturelles énergétiques et indicateurs énergétiques (*NF P01-010 § 5.1.1*)

NOTE : Voir ci après le tableau pour une DVT de 20 ans.

Commentaires relatifs à la consommation de ressources naturelles énergétiques et aux indicateurs énergétiques :

- Le choix des modèles de production d'énergie est donné de manière commune pour tous les produits de construction par le fascicule de documentation FD P 01-015 qui reproduit les données d'ICV des énergies en France et en Europe ainsi que la partie énergie du transport, et précise les règles d'utilisation de ces données.
- Les indicateurs énergétiques doivent être utilisés avec précaution car ils additionnent des énergies d'origines différentes qui n'ont pas les mêmes impacts environnementaux (se référer de préférence aux flux élémentaires).
- Pour une durée de vie de 20 ans, la consommation d'énergie est due à 53% à la phase de production et 45 % à la vie en œuvre (entretien). Le transport est négligeable d'un point de vue énergétique puisqu'il représente moins de 1% de la consommation d'énergie.
- L'entretien sec (aspirateur) est effectué 4 fois par semaine et ce pendant toute la durée de vie, alors que la production des revêtements de sol est effectuée une fois pour un produit qui va pouvoir durer entre 15 et 25 ans. Les impacts de cette production sont répartis sur la durée de vie alors que les impacts de l'entretien sont constants tout au long de la durée de vie.

SFEC - Sol Linoléum Acoustique 6/50 Editiondécembre 2007

Figure 38 - FDES du linoléum acoustique – Extrait du chapitre 2.1 expliquant les modalités de comptage des consommations d'énergie

La base INIES reprend les informations des FDES. On peut distinguer deux types de fiches :

> les fiches d'auto-déclaration individuelle, spécifiques à des produits et produites par les fabricants (exemple : la FDES de l'isolant à base de textiles recyclés Métisse® est spécifique à cet isolant) ;

> les fiches d'auto-déclaration collective, produites par des groupements de professionnels (fédérations ou syndicats nationaux) qui sont valables pour une liste de produits définis par les fabricants ayant participé à l'élaboration de la FDES. Les données recueillies proviennent donc de plusieurs marques. Les valeurs finales présentées sont alors des valeurs moyennées ce qui génère plus d'incertitudes.

De plus, pour compléter l'offre de FDES, un troisième type de fiches a été intégré au logiciel ELODIE. Ces « fiches composant » sont élaborées par le CSTB pour des matériaux types tels que le mur rideau, le béton pour fondation, pour poteau, etc. La présence de ces fiches peut être utile lorsque les produits ne sont pas clairement définis ou lorsque leur FDES n'existe pas.

Les PEP

Un PEP est un Profil Environnemental Produit, il s'applique particulièrement aux produits électriques et électroniques. Les PEP ont été développés en France par un programme interprofessionnel de l'industrie électrique, électronique et aéraulique représenté par l'association PEP Ecopassport[21]. Les PEP sont téléchargeables sur le site de l'association. Ils s'appuient sur la norme ISO 14020 relative aux principes généraux des déclarations environnementales et sur la norme ISO 14025 relative aux déclarations environnementales de type III. Beaucoup plus succincts que les FDES, car non cadrés par des normes telles que la norme NF P01-010, ils indiquent néanmoins les impacts environnementaux listés par les normes ISO 14020 et ISO 14025 :

Indicateurs environnementaux	Unité/UF
Indicateurs obligatoires	
Indicateurs d'impact environnemental	
Contribution à l'effet de serre	g éq CO2
Contribution à la destruction de la couche d'ozone (DO)	g éq CFC-11
Contribution à l'eutrophisation de l'eau	g éq PO43-
Création d'ozone photochimique	g éq C2H4
Contribution à l'acidification de l'air	g éq H+
Flux élémentaires	
Énergie primaire totale consommée par le produit pendant son cycle de vie	MJ
Consommation d'eau	l ou dm^3
Indicateurs optionnels	
Épuisement des ressources naturelles	année-1
Contribution à la toxicité de l'air	m^3
Contribution à la toxicité de l'eau	m^3
Production de déchets dangereux	kg

Figure 39 - Tableau des indicateurs environnementaux d'un PEP

Le cahier des charges d'un PEP, appelé « Règles de définition », est disponible sur le site de PEP Ecopassport[22].

L'analyse du cycle de vie est réalisée à l'aide du logiciel d'ACV EIME, développé par le Bureau Veritas[23] et particulièrement adapté à l'industrie électrique et électronique. L'analyse est effectuée sur les phases de cycle de vie suivantes : matières premières, fabrication, distribution et utilisation sans prendre en compte le traitement du produit en fin de vie. Contrairement aux FDES, aucun détail de calcul d'impact n'est communiqué. Seule la répartition par phase de cycle de vie est décrite.

21 - http://www.pep-ecopassport.org
22 - http://www.pep-ecopassport.org/documents/PEPPCR%20ed2%20FR2011%2012%2009.pdf
23 - http://www.codde.fr/page.php?rubrique=6&ssRubrique=10

La liste officielle des PEP est disponible sur le site de PEP Ecopassport. L'objectif initial de PEP Ecopassport était de pouvoir intégrer les PEP dans le logiciel ELODIE, développé par le CSTB, pour faciliter la prise en compte des équipements dans l'analyse du cycle de vie d'un bâtiment.

Les PEP sont une version française des EPD (voir paragraphe suivant).

Le passage des FDES et PEP aux EPD

EPD = Environnemental Product Declaration, soit en français DEP = Déclaration Environnementale de Produit.

L'EPD est actuellement une déclaration environnementale conforme à la norme ISO 14025 définissant l'étiquetage environnemental de tout type de produit. Elle est établie selon les paramètres définis par la série de norme ISO 14040[24]. EPD est le terme générique pour désigner une déclaration environnementale conforme à la norme ISO 14025 mais désigne également une marque déposée EPD® qui réalise ce type de déclaration. Les EPD apportent aux entreprises la preuve de leur engagement à fournir des informations environnementales pertinentes quant à leurs produits. Une déclaration environnementale de produit est vérifiée par une tierce partie et est présentée selon un format uniforme et reconnu internationalement.

Une nouvelle norme européenne tend à cadrer l'établissement de ces EPD. Cette norme NF EN 15804, intitulée « Contribution des ouvrages de construction au développement durable — Déclarations environnementales sur les produits — Règles régissant les catégories de produits de construction » décrit notamment les indicateurs environnementaux devant être pris en compte ainsi que le périmètre de l'analyse (les différentes phases de vie). Cette norme s'applique aussi bien à des produits de construction qu'à des substances, des services ou des systèmes constructifs. Elle remplacera à terme la norme NF P01-010 actuellement en vigueur en France qui définit le cadre des FDES. Elle est notamment conforme aux normes internationales ISO 14025 qui concerne l'affichage environnemental et ISO 14040 qui concerne la méthodologie d'ACV, puisque ces normes définissent un cadre minimal et ne limitent pas le champ d'étude.

Ainsi, s'il est affiché sur une EPD, le champ d'étude n'est pas constant d'un produit à l'autre. Il convient donc d'être particulièrement attentif quant à la définition de l'énergie primaire utilisée et aux limites d'étude dans la chaîne du produit. C'est pourquoi il est spécifié que les EPD ne sont pas des outils de comparaison de produits ou services de construction.

Figure 40 - Transition des anciens formats vers la nouvelle EPD

24 - Cf. 10.7. Normes et réglementations françaises, européennes et internationales.

Exemples de périmètres pris en compte dans 2 EPD :

- bloc de béton KBB : arrêt aux portes de l'usine et énergie procédé uniquement ;
- isolant polystyrène LAPE : recyclage mais distinction entre énergie procédé et énergie matière.

Les indicateurs qui doivent au minimum être pris en compte dans une EPD sont ceux spécifiés dans les tableaux suivants, extraits de la norme NF EN 15804 en question[25].

Tableau 3 — Paramètres décrivant les impacts environnementaux

Catégorie d'impact	Paramètre	Unité de paramètre exprimée par unité fonctionnelle/déclarée
Réchauffement climatique	Potentiel de réchauffement global, GWP	kg de CO_2 équiv.
Appauvrissement de la couche d'ozone	Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique, ODP	kg de CFC 11 équiv.
Acidification des sols et de l'eau	Potentiel d'acidification des sols et de l'eau, AP	kg de SO_2 équiv.
Eutrophisation	Potentiel d'eutrophisation, EP	kg de $(PO_4)^{3-}$ équiv.
Formation d'ozone photochimique	Potentiel de formation d'ozone troposphérique, POCP	kg d'éthène équiv.
Epuisement des ressources abiotiques - éléments	Potentiel d'épuisement (ADP-éléments) pour les ressources abiotiques non fossiles[a]	kg de Sb équiv.
Epuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles	Potentiel d'épuisement (ADP-combustibles fossiles) pour les ressources abiotiques fossiles[a]	MJ, pouvoir calorifique inférieur

[a] Le potentiel d'épuisement abiotique est calculé et déclaré par deux indicateurs différents :
– ADP-éléments : inclut toutes les ressources de matières abiotiques non renouvelables (c'est-à-dire à l'exception des ressources fossiles) ;
– ADP-combustibles fossiles : inclut toutes les ressources fossiles.

NOTE 1 L'indicateur décrivant l'épuisement des ressources abiotiques fait l'objet de travaux scientifiques complémentaires. L'utilisation de cet indicateur doit être revue lors de la révision de la présente norme.

NOTE 2 Au niveau de l'ACV, les paramètres décrivant l'émission de rayonnements ionisants radioactifs et son impact sur la santé humaine et/ou les écosystèmes doivent être revus lors de la révision de la présente norme.

Figure 41 - Paramètres décrivant les impacts environnementaux extraits du projet de norme PR NF EN 15804

25 - Ou plutôt de son projet, car la version finale n'est sortie qu'en août 2012, trop tard pour actualiser le présent document. Compte tenu de sa date de parution.

Tableau 4 — Paramètres décrivant l'utilisation des ressources

Paramètre	Unité de paramètre exprimée par unité fonctionnelle/déclarée
Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation de matière secondaire	kg
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation nette d'eau douce	m^3

Tableau 5 — Autres informations environnementales décrivant les catégories de déchets

Paramètre	Unité de paramètre exprimée par unité fonctionnelle/déclarée
Déchets dangereux éliminés	kg
Déchets non dangereux éliminés	kg
Déchets radioactifs éliminés	kg

Figure 42 - Paramètres et indicateurs décrivant l'utilisation des ressources et la production de déchets, extrait du projet de norme PR NF EN 15804

Énergie grise non renouvelable $_{ICEB}$ = Énergie primaire **non renouvelable** à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières $_{EPD}$

Énergie grise renouvelable $_{ICEB}$ = Énergie primaire **renouvelable** à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières $_{EPD}$

Synthèse de l'analyse des principales bases de données

	INIES : FDES	KBOB : éco-bilans dans la construction	EPD (selon NF EN 15804)
Définition de l'énergie grise	Énergie primaire totale (= procédé + matière) renouvelable et non renouvelable	Énergie primaire procédé non renouvelable	Énergie primaire procédé renouvelable et non renouvelable
Possibilité d'extraire l'énergie grise selon la définition ICEB[26]	Non Possibilité d'extraire la donnée sur l'énergie procédé totale uniquement (non renouvelable ET renouvelable)	Oui Énergie grise non renouvelable ICEB = Énergie primaire non renouvelable KBOB Énergie grise renouvelable ICEB = Énergie primaire totale KBOB - Énergie primaire non renouvelable KBOB	Oui Énergie grise non renouvelable $_{ICEB}$ = [Énergie primaire renouvelable à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières] $_{EPD}$ Énergie grise renouvelable ICEB = [Énergie primaire non renouvelable à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières] $_{EPD}$
Périmètre	Fabrication -> Démolition Données propres aux produits	Fabrication -> Démolition Sans transport après usine, ni mise en œuvre, ni entretien Données valables pour un type de produit	Minimum exigé : extraction, transport, fabrication. Peut prendre en compte : transport après usine, mise en œuvre, entretien/vie en œuvre et fin de vie
Unité caractéristique	Unité fonctionnelle (par exemple : 1 m² de voile béton 16 cm)	Masse ou surface	Unité fonctionnelle
Durée prise en compte	Durée de vie typique	Durée d'amortissement	Durée de vie typique
Points forts	Accessibilité : gratuité depuis la base INIES	Accessibilité : gratuité depuis base de données KBOB Bonne fiabilité et transparence (données directement issues d'Ecoinvent)	Regroupement de données à l'échelle européenne
Points faibles	Manque de fiabilité et de transparence (fiches auto-déclaratives) Manque un grand nombre de matériaux et composants	Nécessité de calculer l'énergie grise de chaque unité fonctionnelle à partir de celles de ses composants et de leur quantité dans l'unité fonctionnelle	Manque de fiabilité et de transparence (fiches auto-déclaratives) Périmètre de calcul différent selon la volonté du fabricant

26 - Rappel : voir chapitre 4.3 Définition de l'énergie grise selon l'ICEB

POINTS À RETENIR

Utiliser une base de données permettant d'extraire l'énergie grise selon la définition ICEB, l'énergie primaire procédé d'origine renouvelable et non renouvelable sur toute la durée du cycle de vie hors vie en œuvre.

	INIES : FDES	KBOB : éco-bilans dans la construction	EPD (selon NF EN 15804)
Définition de l'énergie grise	Énergie primaire totale (= procédé + matière) renouvelable et non renouvelable	Énergie primaire procédé non renouvelable	Énergie primaire procédé renouvelable et non renouvelable
Possibilité d'extraire l'énergie grise selon la définition ICEB	Non Possibilité d'extraire la donnée sur l'énergie procédé totale uniquement (non renouvelable ET renouvelable)	Oui Énergie grise non renouvelable ICEB = Énergie primaire non renouvelable KBOB Énergie grise renouvelable ICEB = Énergie primaire totale KBOB - Énergie primaire non renouvelable KBOB	Oui Énergie grise non renouvelable $_{ICEB}$ = [Énergie primaire renouvelable à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières] $_{EPD}$ Énergie grise renouvelable ICEB = [Énergie primaire non renouvelable à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières] $_{EPD}$

Avoir un avis critique sur les données disponibles

Type de produits

Le type de données fournies par les bases de données n'est pas toujours identique. Par exemple, la base de données KBOB fournit des données sur des produits génériques, alors que la base de données INIES fournit des données sur des produits assemblés à partir de produits génériques.

Exemple de la fenêtre :
KBOB décompose l'élément en cadre de fenêtre et en vitrage, et donne des valeurs en MJ par tonne qu'il convient de convertir en élément prêt à être installé sur le chantier étudié.
INIES donne la valeur pour l'élément fini (fenêtre montée avec son cadre et son vitrage).

Périmètre

Les calculs d'énergie grise ne comptabilisent pas nécessairement toutes les phases du cycle de vie d'un produit : la base de données INIES effectue le calcul sur tout le cycle de vie, KBOB sur la fabrication et la démolition et EPD sur extraction, transport et fabrication à minima plus d'autres phases éventuellement selon la volonté du fabricant.

Fiabilité

Base de données KBOB : résultats directement issus de la base de données suisse Ecoinvent qui est vérifiée. Base de données INIES : résultats issus des données des fabricants, et qui pourraient, sans vérification par une tierce partie, favoriser un produit en particulier.

Incertitude

Le calcul de l'énergie grise d'un composant ou d'une unité fonctionnelle donne un ordre de grandeur, et chacun des résultats est associé à une marge d'incertitude (même si celle-ci n'est pas toujours explicitée clairement).

POINTS À RETENIR

Éviter d'utiliser des bases de données différentes pour comparer des matériaux ou produits entre eux.

Les bases de données utilisent des définitions de l'énergie grise et des périmètres différents, ce qui peut conduire à des résultats incohérents.

À défaut, si le manque de données oblige à recourir à des bases de données différentes pour faire des calculs sur un bâtiment complet, et que ce qui importe est l'ordre de grandeur final, être explicite sur les périmètres des données utilisées et leurs incertitudes.

Utiliser une base de données mise à jour

L'utilisation d'une base de données mise à jour permet de prendre en compte l'actualisation des données (évolution positive des process, évolution des modes de transport du produit, etc.).

6.2 - Les outils de calcul

La question : quel outil utiliser ?

Lorsqu'on analyse différentes études, on constate que les différents outils de calculs testés ne produisent pas les mêmes résultats. Voici quelques exemples qui illustrent ces différences de résultats.

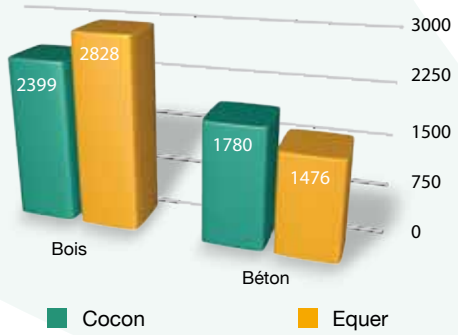


Figure 43 – Étude comparative de deux variantes structurelles pour le bâtiment du CE à Roissy avec les logiciels ELODIE et Cocon – Graphique ICEB à partir des données du rapport d'H. Leh

Bâtiment du CE à Roissy[27] d'une surface SHON de 1 280 m² : calculs d'énergie grise de deux solutions structurelles (structure bois, structure béton) à partir des logiciels EQUER et COCON.

Les résultats des calculs en énergie primaire totale (en kWh/m²$_{SHON}$ sur la durée de vie de 30 ans du bâtiment) sont traduits graphiquement dans le tableau ci-contre.

Dans les deux cas, la structure bois est plus consommatrice d'énergie grise que la structure béton, car les deux outils font un calcul en énergie primaire totale (et donc incluent l'énergie matière). Lorsque le calcul est fait sans l'énergie matière du bois avec le logiciel COCON, alors le résultat pour l'énergie grise est autour de 1 600 kWh/m²$_{SHON}$ et la structure bois devient moins consommatrice en énergie grise que la structure béton.

On constate que la structure bois est plus consommatrice d'énergie avec EQUER qu'avec COCON et l'inverse pour la structure béton. Ce qui est difficilement interprétable, c'est que les différentiels des résultats des calculs des deux logiciels pour les deux structures soient opposés. Ceci est vraisemblablement dû aux différences des bases de données utilisées.

27 - Hélène Leh. Évaluation des Impacts Environnementaux des Bâtiments au niveau Structure et Matériaux. Rapport de stage, Mai- septembre 2010.

Étude COIMBA[28]

Maison des Hauts de Feuilly : maison individuelle d'une surface SHON de 157 m² en ossature bois avec un niveau de performance Passivhaus. Durée de vie 50 ans.

	ELODIE	EQUER - Pleiade	SimaPro
Énergie primaire totale en kWhep/m²$_{SHON}$	62,8	64	75,1

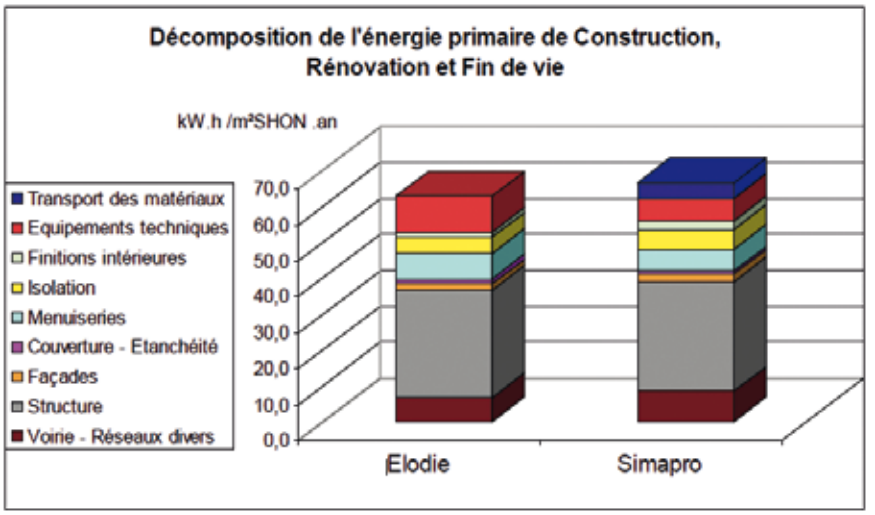


Figure 44 - Étude COIMBA - Décomposition de l'énergie primaire pour la maison des Hauts de Feuilly - Comparaison des résultats obtenus avec ELODIE et SIMAPRO

La différence entre les résultats des deux logiciels ELODIE et COCON est due essentiellement à la prise en compte du transport des matériaux et de l'énergie grise des équipements.

Constat : les différents logiciels donnent des résultats différents : cela est dû essentiellement aux bases de données utilisées et aux différences de prise en compte des composantes de l'énergie grise et des phases de l'ACV.

Notre question : quel outil utiliser pour optimiser l'énergie grise d'un bâtiment et comparer plusieurs solutions constructives et à quel stade d'un projet ?

Qu'est-ce qu'un bon outil de calcul ?

Un bon outil de calcul doit permettre de :

- évaluer les principaux postes consommateurs en énergie grise d'un bâtiment ;
- comparer certaines solutions constructives entre elles, ou certains produits entre eux ;
- faire évoluer le niveau de détail du calcul, en permettant un calcul simplifié dès les phases concours, jusqu'à un calcul détaillé au moment de la fin des études ;
- identifier les données d'ACV utilisées, et éventuellement utiliser d'autres sources de données tout en les justifiant.

La difficulté pour les concepteurs est de savoir quel outil utiliser, mais surtout de savoir quelles données sont « cachées » derrière l'outil et donc quelle exploitation du résultat va être possible.

Nous vous donnons donc, dans la suite de ce chapitre dédié aux outils de calcul, les principales caractéristiques de quelques outils utilisés actuellement en France et en Europe.

28 - NOBATEK, ARMINES, CSTB, IZUBA ÉNERGIES, ENERTECH. Développement des outils d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments par analyse du cycle de vie. COnnaissance de l'IMpact environnemental des BAtiments. COIMBA 2011. 244 pages.

Les outils expérimentés par l'ICEB

EQUER

Nom de l'outil : EQUER
http://www.izuba.fr/logiciel/EQUER
Nom de l'éditeur :
Izuba Énergies http://www.izuba.fr/
Données sources : Ecoinvent
Données extraites : ACV du projet selon 12 indicateurs

EQUER a été réalisé à partir des travaux du Centre énergétique de l'École des Mines de Paris et de l'INERIS (Institut d'Évaluation des Risques Industriels) ainsi qu'en collaboration avec des professionnels du secteur. C'est le premier logiciel d'ACV développé en France pour le secteur du bâtiment. Il s'appuie sur la base de données Ecoinvent. Il est couplé au logiciel de Simulation Thermique Dynamique (STD) Pléiades + COMFIE, édité par IZUBA. La licence de ce logiciel est d'environ 500 € HT et comprend une assistance technique et une mise à jour durant 1 an.

EQUER peut être utilisé pour tout type de bâtiment neuf et existant, sauf pour les bâtiments industriels spécifiques.

Les données d'entrées à saisir pour une analyse de cycle de vie complète s'effectuent sur les cinq modules suivants :

- module transport ;
- module eau ;
- module énergie : type d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire ;
- module déchets ;
- module matériaux de construction avec une correspondance avec la Simulation Thermique Dynamique.

Les résultats d'ACV sous EQUER s'extraient sous forme de schéma radar ou d'histogramme. Le radar offre la possibilité de choisir les indicateurs que l'on souhaite mettre en avant, c'est-à-dire :

- soit les 12 présentés ci-dessous ;
- soit une sélection.

Énergie consommée en GJ	Déchets radioactifs en dm^3	Acidification en kg SO_2	Odeur en Mm^3
Ressources abiotiques non renouvelables, sans unité	Déchets inertes produits en tonnes	Formation d'ozone photochimique en kg éq. C_2H_4	Toxicité humaine en kg
Eau utilisée en m^3	Effets de serre en t éq. CO_2	Eutrophisation en kg éq. PO4	Écotoxicité aquatique en m^3

Figure 45 : EQUER - ACV bâtiment exprimée avec un schéma radar sur les 12 indicateurs

EQUER permet la comparaison de plusieurs variantes pour un même bâtiment.

Les résultats peuvent également être visualisés sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment : la construction, l'utilisation, la rénovation et la démolition pour identifier la contribution des différentes phases.

Figure 46 - EQUER - ACV bâtiment exprimée sur les différentes phases du cycle de vie

Pour une meilleure compréhension des résultats d'ACV et une amélioration continue, EQUER propose un éco-profil du projet étudié en le comparant pour chaque impact à un équivalent habitant/année (en consommation de fluides, émission de polluants…).

ELODIE

Nom de l'outil : ELODIE
http://www.elodie-cstb.fr/
Nom de l'éditeur : CSTB - Département Energie Santé et Environnement
http://www.cstb.fr/
Données sources : FDES, PEP, fiche composant ELODIE, DES (Déclaration environnementale de service)
Données extraites : ACV du projet selon 17 indicateurs

ELODIE est un outil d'ACV mis en place par le CSTB à partir des données de la base INIES. Il a été conçu en lien avec la création de la certification NF bâtiment tertiaire - Démarche HQE® afin de pouvoir répondre plus aisément à la cible 2 du référentiel HQE. Un accès à la version de démonstration est gratuitement disponible en ligne sur le site Internet : http://www.elodie-cstb.fr/Default.aspx. La version complète est mise à disposition après une formation à l'outil, dispensée par le CSTB (coût 2000 € TTC). Il a pour objectif de calculer une ACV intégrale d'un projet.

Son périmètre d'utilisation est large, flexible et précis. En effet, il est aussi bien utilisable pour des projets de construction neuve que pour de la réhabilitation, aussi bien pour de la construction individuelle que pour du tertiaire et ce, partout en France. Il prend ainsi en compte le type de bâtiment, sa surface, sa localisation, son altitude, sa fréquence et son intensité d'occupation, le type de performance thermique visée, etc.

Les données d'entrées du logiciel sont intégrées suivant 4 modules d'inventaire :

- la contribution des produits de construction ;
- la contribution de la consommation d'énergie du bâtiment en opération ;
- la contribution de la consommation d'eau du bâtiment en opération ;
- la contribution du chantier (disponible sur la version payante uniquement) intégrant les postes d'énergie, d'eau, de transport et d'immobilisation.

Les bases de données utilisées par ELODIE pour les matériaux de construction sont :

- la base INIES qui regroupe les FDES ;
- les « fiches composants » élaborées par le CSTB pour représenter des matériaux type, souvent absents de la base INIES, tels que le mur rideau, le béton pour fondation, pour poteau, etc. ;
- les FDES recueillies directement auprès des fabricants, que l'utilisateur peut intégrer.

Comme mentionné dans le retour d'expérience des huit collèges, l'outil a cependant ses limites, notamment concernant l'énergie grise suivant la définition de l'ICEB. Le logiciel calcule l'énergie primaire totale du projet mais ne permet pas toujours d'identifier l'énergie procédé et en tout cas, jamais l'énergie procédé sans l'énergie procédé en phase exploitation. Les résultats ne sont donc pas exploitables directement.

Figure 47 - ELODIE - Exemple de sortie des résultats du logiciel en ligne

Autre fonction manquante : la répartition des impacts par phase (fabrication, transport, mise en œuvre, vie en œuvre, fin de vie).

Les impacts sont calculés selon les 17 indicateurs prévus par la norme NF P01-010. Ils sont visualisables en permanence tout du long de l'entrée des données. Les résultats peuvent être générés sous forme de tableur Excel® dans lequel toutes les informations et toutes les entrées sont récapitulées et de tableaux et graphiques.

Outil TRIBU

Nom de l'outil : Outil TRIBU.

Nom de l'éditeur : Tribu.
http://www.tribu-concevoirdurable.fr

Données sources : KBOB

Données extraites : ACV du projet selon 1 indicateur, l'énergie grise

L' outil TRIBU est un outil de calcul en énergie grise développé par le bureau d'études TRIBU, pour réaliser des calculs simplifiés dès les phases initiales de conception d'un projet.

Les intérêts majeurs de cet outil sont :

- d'utiliser une base de données fiable : la base de données KBOB qui s'appuie sur Ecoinvent ;
- d'identifier les grands postes consommateurs en énergie grise dès la phase concours, pour ensuite travailler à réduire l'impact des postes les plus consommateurs ;
- en phase concours lorsque TRIBU est en AMO DD, de faire travailler les équipes de maîtrise d'œuvre sur une même base de calcul, et donc de pouvoir comparer les projets entre eux.

L'outil TRIBU a pour interface un simple tableur Excel, qui met à disposition des concepteurs les données source à utiliser, en kWh/unité de volume ou de surface de matériau, qui sont issues de la base de données KBOB. Le tableau suivant est un extrait de la base de données disponible dans l'outil.

Matériaux	c_{EP} énergie grise kWh/ m^3	Densité tonne/m^3
structure, façade		
béton	550	2,4
béton armé	850	2,9
parpaing	650	2,4
béton cellulaire	600	0,6
brique, terres cuites	800	1
bois naturel (charpente, bardages)	500	0,5
bois lamellé-collé	1 250	0,5
panneaux bois reconstitué	2 450	0,7
acier, charpentes métalliques	63 200	7,9
aluminium	135 000	2,7
autres métaux non ferreux (Cuivre, Zinc), alliages	160 000	8
fibrociment	5 400	1,8
isolants		
isolant à base de produits végétaux, cellulose	100	0,06
verre cellulaire	750	0,10
isolant laine de roche	600	0,10
isolant laine de verre	400	0,03
isolant plastique alvéolaire	550	0,02
revêtements sols, murs, plafonds		
sols souples plastiques, moquettes	26 000	1,3
sols souples linoléum	13 000	1,3
sols durs (céramique, pierre reconstituée)	7 600	1,9
parquets	2 100	0,7
résines (de béton, de sol)	20 000	1
peintures	12 000	1
cloisons, faux plafonds	700	0,2
étanchéité membrane EPDM, PVC	22 500	0,9
enrobés, asphalte coulé	2 300	2,3
	c_{EP} énergie grise - kWh/ m^2	
menuiserie bois + DV	500	
menuiserie bois + TV	600	
menuiserie alu + DV	600	
menuiserie alu + TV	700	
panneaux photovoltaïques	400	
panneaux solaires thermiques	550	

Figure 48 - Outil TRIBU - Tableau des données utilisées, issues de la base de données KBOB.

L'énergie grise du produit, en kWh/m³ ou m², est l'énergie primaire procédé non renouvelable, comme le stipule la base de données KBOB.

La masse de chaque produit doit être estimée par métré. Ce métré pouvant être de plus en plus affiné au fur et à mesure des études de conception.

Comme la base de données KBOB ne comptabilise pas le transport du produit de l'usine jusqu'au chantier, l'outil TRIBU permet d'ajouter une part dédiée au transport. Toujours pour un calcul simplifié, l'outil fait appel à des ratios en kWh/tonne selon le mode de transport utilisé – équivalent distance parcourue :

Distance	Mode de transport	kWh/tonne
≤ 500 km	inclus dans bilan ci-dessus	0
500 km < d ≤ 2000 km	poids lourds	1 500
2000 km < d ≤ 5000 km	train	600
d > 5000 km	bateau	500

Figure 49 – Outil TRIBU - Méthode de calcul du supplément d'énergie grise liée au transport

Cet outil utilise donc des valeurs très approchées et ne prend pas en compte le taux de remplissage de chaque moyen de transport (plus on transportera de matériaux en un voyage, meilleure sera l'efficacité en énergie grise).

Le bilan C_{ep} énergie grise obtenu pour un bâtiment est la somme de l'énergie grise de chaque matériau constituant le bâtiment :

C_{ep} total = [C_{ep} énergie grise matériau (kWh/t) + C_{ep} liée au transport (kWh/t)] x masse matériau (t)

COCON

Nom de l'outil : COCON
http://www.eosphere.fr/COCON-comparaison-solutions-constructives-confort.html

Nom de l'éditeur : Luc FLOISSAC

Données sources : une centaine dont principalement FDES

Données extraites : ACV du projet selon plusieurs indicateurs

COCON est un logiciel de **CO**mparaison de solutions **CO**nstructives, de **CON**fort et d'émissions de CO_2. La base de données « MATHIERES »[29] est issue d'une compilation de 97 sources réalisées par Luc Floissac - chercheur et enseignant à l'école d'architecture de Toulouse et conseiller libéral en environnement - et Laure Fernandez. Ces données sont issues de FDES disponibles sur le site d'INIES, de données mises à disposition par des fabricants, de données européennes et d'extrapolations. La source des données est indiquée pour chaque matériau dans le logiciel.

L'utilisation du logiciel se fait actuellement sous format Excel.

Une version de démonstration gratuite est téléchargeable sur le site Internet : http://www.eosphere.fr/COCON-logiciel-de-COmparaison-de.html.

Une version découverte pour particuliers comprenant un logiciel de calcul de cycle de vie de bâtiments et une licence découverte pour l'installation sur un poste coûte 60 € HT. Une version réservée aux organismes de formation, d'éducation, d'information au public et comprenant un logiciel de calcul de cycle de vie de bâtiments et une licence donnant droit à l'installation sur 15 postes vaut 300 € HT. Le prix de la version professionnelle avec formation est d'environ 500 € HT et sans la formation, 300 € HT.

29 - MATHIERES = Base de données contenant une description des MAtériaux, de leurs caractéristiques THermiques, de leurs Impacts Environnementaux Et Sanitaires

Comme l'indique le site Internet, la licence d'utilisation de COCON une fois acquise est « perpétuelle ». Elle est utilisable indéfiniment dans la configuration délivrée. Les mises à jour du logiciel sont gratuites la 1ère année.

Un projet tertiaire, neuf ou réhabilité, se décrit selon les familles suivantes : aménagements (cloisons, faux planchers et faux plafonds...), couvertures, dalles, planchers, sols, fondations, soubassements, huisseries, fenêtres et murs. Pour chacune de ces familles, les couches de matériaux qui composent les parois sont décrites en précisant les surfaces, les épaisseurs et la fonction pour laquelle elles sont utilisées.

Les principales informations calculées par le logiciel et sur la base des 17 indicateurs environnementaux contenus dans les FDES sont :

- l'énergie grise incorporée ;
- la participation au changement climatique ;
- l'épuisement des ressources ;
- la résistance thermique ;
- le déphasage thermique ;
- l'inertie thermique quotidienne (calculée selon la norme internationale EN ISO 13786).

Des schémas radars offrent une lecture simple et pédagogique du bâtiment pour les 6 impacts décrits ci-dessus. Le logiciel permet également de comparer côte à côte jusqu'à 6 bâtiments ou 6 variantes d'un même bâtiment ayant un ou deux critères communs.

COCON permet aussi de calculer le montant de la taxe carbone applicable à des matériaux de constructions, des parois ou à l'ensemble d'un ou plusieurs bâtiments.

Enfin, une des dernières spécificités de COCON repose sur le fait que les déplacements et les modes de transports pour les usagers du bâtiment peuvent être pris en compte.

Un graphique spécifique permet d'examiner le contenu en énergie grise d'une paroi :

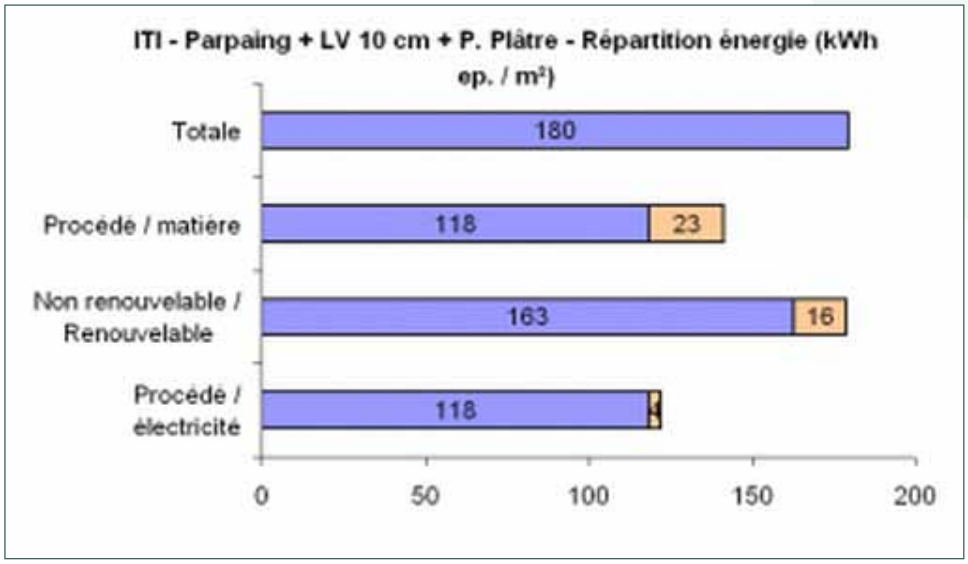


Figure 50 : COCON - Contenu en énergie grise d'une paroi en parpaings isolés par l'intérieur. Source : http://www.eosphere.fr/COCON-Les-onglets-de-description.html

Synthèse des outils de calculs

LOGICIEL	EQUER	ELODIE	OUTIL TRIBU	COCON
Base de données utilisée / Fiabilité	Ecoinvent (Suisse)	INIES (France) Fiches composants établies par le CSTB Données fabricants	KBOB	100 sources de données : INIES (France), EPD, Ecoinvent (Suisse), …
	Nécessité de contextualiser certaines données en modifiant le mix énergétique	Données pas nécessairement vérifiées par une tierce partie	Fiabilité des données Nécessité de contextualiser certaines données en modifiant le mix énergétique	Nécessité de ré-affiner certaines données lorsque les FDES n'existent pas Nécessité de contextualiser certaines données Ecoinvent en modifiant le mix énergétique Transparence totale sur les sources
Utilisateurs	Architectes et bureaux d'études	Architectes et bureaux d'études	Architectes et bureaux d'études	Particuliers 5 % Organismes de formations 10 % Maîtres d'ouvrages 5 % Bureaux d'études 30 % Architectes 45 % Industriels 5 %
Possibilité d'identifier l'énergie grise selon définition de l'ICEB[30]	**Oui,** par l'indicateur « ressources abiotiques non renouvelables ». Pas de données sur l'énergie procédé renouvelable	**Ne permet pas toujours** d'identifier l'énergie procédé totale et encore moins l'énergie procédé en exploitation	**Calcule l'énergie procédé non renouvelable.** Pour calculer l'énergie procédé renouvelable, il faut reprendre dans la base de données KBOB les valeurs d'énergie primaire globale, et soustraire la part d'énergie procédé non renouvelable	**Presque** Permet d'identifier l'énergie procédé totale mais ne distingue pas l'énergie procédé renouvelable et non renouvelable. Ne permet pas non plus d'identifier l'énergie procédé hors exploitation.
Périmètre d'intervention	Construction, utilisation, rénovation, démolition transport à partir de l'usine, installation sur chantier et entretien pendant utilisation non pris en compte	Prise en compte de tous les composants d'un ouvrage simple Bilan environnemental global d'un ouvrage	Aide à la décision dès phase concours Bilan environnemental global d'un ouvrage Transport à partir de l'usine pris en compte, installation sur chantier et entretien pendant utilisation non pris en compte	Construction, utilisation, rénovation, démolition Transport
Capacité d'intervention dans les données ACV de l'outil / Transparence		Possibilité d'ajouter de nouvelles fiches par l'utilisateur.	Oui, par simple modification du ratio kWh/tonne	Possibilité d'ajouter de nouvelles données
				Récupération des données
Simplicité d'utilisation / Ergonomie de l'interface	Simplicité d'utilisation	Facile à appréhender	Très simple d'utilisation	Une explication de la méthodologie est accessible sur le site du concepteur
	Interface utilisateurs conviviale	Interface spécifique ergonomique et complète	Interface Excel	Interface Excel
	Nécessite 2 jours de formation par le biais de Comfie Pléiades	1 journée de formation obligatoire et comprise dans le prix pour la version complète	Pas de formation nécessaire	Nécessite 2 jours de formation
	Quelques jours de travail pour une étude	Selon taille du projet et analyse du projet (matériaux, équipements, consommations), de 2 à 7 jours	1 jour de travail pour une étude	Quelques jours de travail (de 2 à 4) pour une étude
	Peut être lourd du fait de l'utilisation systématique de Comfie	Peut être lourde car entrée de nombreuses données précises	Très souple et simple	Souple car la description des parois est simple à effectuer Format Excel donc pas besoin de relancer un calcul à chaque modification

30 - Rappel : voir chapitre 4.3 et la définition de l'énergie grise selon l'ICEB

LOGICIEL	EQUER	ELODIE	OUTIL TRIBU	COCON
Présentation des résultats	Schémas radars et histogrammes	Visualisation des indicateurs en temps réel (au fur et à mesure de l'entrée des données) + Fichier Excel complet avec descriptif du projet, récapitulatif des données utilisées et résultats sous forme de tableaux, histogrammes et radars.	Résultat en kWh/m² Manque une présentation graphique. Interface à enrichir pour la présentation des résultats.	Schémas radars
	Présentation des résultats limités		Interface à enrichir pour comparer différents systèmes constructifs/ produits	Comparaison de plusieurs variantes ou bâtiments (jusqu'à 6). Comparaison d'un même bâtiment avec un ou deux critères différents
				Pédagogique car multitude de graphiques différents
Autres utilisations possibles	Réalisation de Simulation Thermique Dynamique car logiciel lié à Comfie		Outil simplifié permettant de relever les enjeux dès les phases initiales de conception. Base à l'amélioration du projet.	Calcul inertie, résistance thermique, etc.
Coût	500 € HT en ayant déjà acheté Comfie Pléiades	Version de démonstration gratuite Version complète : 1 200 € HT (outil + formation)	Gratuit	Plusieurs formules, de gratuite à 500 € HT avec formation

Recommandations ICEB

POINTS À RETENIR

Utiliser un outil d'ACV adapté à la phase de projet

L'outil doit être au service des choix de conception. Il doit permettre :

- en phase esquisse, d'identifier les postes les plus consommateurs d'énergie grise et de faire les choix de principes constructifs en conséquence,
- en phase AVP, d'affiner les choix par des comparaisons de matériaux, d'ensembles fonctionnels, d'équipements,
- en phases PRO et réception de faire un bilan.

En phase esquisse, l'outil doit être simple et peu consommateur de temps. La précision n'est pas recherchée mais uniquement les ordres de grandeur.

➜ Outil TRIBU

Aux autres phases, l'ensemble des 4 outils listés dans la synthèse peut être utilisé (sans exclusivité) du moment qu'une comparaison entre plusieurs types de solutions est faisable.

POINTS À RETENIR

Choisir l'outil dont la base de données est adaptée à l'opération

Les outils sont intimement liés à leurs bases de données.
On distingue deux types d'outils :

- les outils utilisant une seule base de données : généralement Ecoinvent ou KBOB basée sur Ecoinvent,
- les outils utilisant plusieurs bases de données : par exemple les outils ayant fait le choix de la base de données INIES. Celle-ci ne comportant pas assez de composants ou matériaux est complétée par des données fabricants, les EPD, les PEP, Ecoinvent, des calculs internes…

Pour les outils utilisant la base de données Ecoinvent, il est important de retenir que le mix électrique n'est pas celui de la France et de faire des corrections.
Pour les outils utilisant un mix de bases de données, il est important de pouvoir identifier pour chaque composant quelle est la source, de pouvoir la changer au besoin et, enfin, d'utiliser les résultats en incluant une marge d'erreur significative.
Enfin, rappelons qu'à ce stade de maturité du sujet de l'énergie grise, l'important est aujourd'hui, plus que d'avoir des calculs très précis, de permettre aux acteurs d'un projet de se poser les questions les plus pertinentes et de faire des choix judicieux sans idées préconçues.

Choisir un outil proposant des comparateurs de résultats lisibles facilitant la prise de décision

Résultats efficaces pour les études et prises de décisions

Avant toute chose, un logiciel d'Analyse de Cycle de Vie est un outil d'aide à la décision dans le choix de matériaux, de procédés constructifs, de modes de transport, etc. le moins impactant possible pour l'environnement et la santé.
Il doit permettre de modéliser et comparer des variantes pour les principes constructifs, les matériaux, les équipements… mais aussi de comparer son propre bâtiment à d'autres bâtiments sur la base de critères choisis.

Résultats lisibles

L'outil doit offrir un déchiffrage pédagogique des résultats des impacts environnementaux du bâtiment si possible sous différentes formes : schéma radar, histogramme, tableau, etc.

8 logements au 25 rue Bourgon, Paris - Architecte : Atelier D – Photo : Atelier D

7. Comment réduire l'énergie grise ?

Pour réduire l'énergie grise, il faut travailler sur 3 échelles :

- les matériaux et équipements pour choisir ceux qui, à service rendu équivalent, vont consommer le moins d'énergie grise possible en étant attentif à ne pas générer d'autres impacts négatifs ;
- le bâtiment et l'aménagement de la parcelle pour choisir la forme, la compacité, les proportions de surfaces vitrées/surfaces opaques, l'orientation, les principes d'aménagement extérieur qui vont permettre d'optimiser les consommations d'énergie grise ;
- l'aménagement urbain avec une réflexion qui dépasse l'énergie grise sur la densité, les transports des usagers, les réseaux.

Pour faciliter la compréhension, nous avons organisé cette partie selon les différentes phases d'une opération de construction/réhabilitation :

> programmation ;
> conception ;
> réalisation ;
> exploitation ;
> fin de vie.

7.1 – Programmation

Programmation urbaine

Quelle localisation par rapport au transport des usagers ?

Le bilan énergétique global d'un bâtiment dépasse très fortement le périmètre du bâtiment et de son site d'implantation. En effet, il est très fortement impacté par les transports de ces usagers (personnel, habitant, visiteur, personnels d'entretien/maintenance…) et des marchandises, équipements liés à son activité.

Quelques ordres de grandeur :

> entre une ville compacte et bien desservie en transports collectifs et une ville étalée et sans transports collectifs, la dépense d'énergie/habitant peut être dans un rapport de 1 à 7[31] ;
> un ménage périurbain consomme 3 fois plus d'énergie pour ses déplacements de proximité qu'un ménage résidant au centre, à taille, composition et revenus égaux[32] ;
> l'étude faite par SYMOE sur l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre de la ZAC de la porte de Valenciennes à Lille, montre que 31 % des émissions du quartier sont dues aux déplacements tous modes ;
> le bilan carbone des magasins IKEA en France en 2009 montre que la moitié des émissions sont liées au déplacement des clients et le quart au transport des marchandises, ce qui est assez attendu compte tenu de l'activité, mais les proportions sont frappantes.

31 - Les cahiers de l'aménagement urbain - Éléments pour une meilleure " gestion des déplacements " dans les opérations d'aménagement - Nadège DIDIER et Jean-Pierre TROCHE - Groupe RE-Sources pour l'ADEME – Juin 2001

32 - Études sur les « Budgets énergie environnement déplacements » de l'INRETS, in Desjardins X. et Llorente M., Revue de littérature scientifique sur le lien entre les formes d'organisation territoriale, les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre. Quel rôle pour l'urbanisme et l'aménagement du territoire face au changement climatique ? PUCA, Juin 2009.

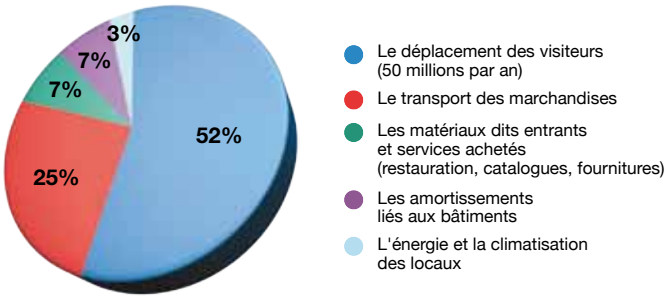


Figure 51 - Bilan carbone IKEA France - Mise en forme ICEB d'après données IKEA

Quelle densité pour optimiser les consommations d'énergie ?

Les transports sont liés à l'étalement urbain, à la faible densité et à la monofonctionnalité du tissu urbain. Un quartier où il y a des logements, des emplois, des services, des équipements, des espaces verts génère beaucoup moins de transport qu'un quartier spécialisé en logements, en emplois… La mobilité locale représente 70 % des émissions de CO_2 liée à la mobilité des ménages, ce qui représente un impact important à la fois en termes d'émissions et en termes de budget. En règle générale, la mobilité forcée diminue avec l'augmentation de densité mais il existe un effet contraire qui est l'augmentation de la mobilité de loisirs avec des trajets longue distance pour des habitants en site urbain dense qui pourrait compenser les gains d'énergie induits par la densité[33].

En programmation urbaine, travailler la densité comme limitation de l'étalement urbain en créant un véritable cadre de vie avec de la mixité fonctionnelle, sociale et des « respirations » pour les activités récréatives, favoriser les transports collectifs et les modes de déplacements doux.

Par ailleurs, dans un tissu urbain insuffisamment dense, la desserte en transport en commun n'est pas viable. De même pour les réseaux d'énergie, ce qui limite la palette des choix possibles.

La création de réseaux consomme de l'énergie grise. Dans le cas d'un tissu urbain peu dense, il est intéressant de réfléchir aux possibilités de s'affranchir totalement ou partiellement des réseaux ou de limiter leur nombre. Par exemple, si la réglementation le permet, gérer les eaux pluviales sur la parcelle par un traitement paysager, faire de l'assainissement autonome, ne pas utiliser de gaz, avoir recours aux énergies locales, créer un réseau local pour l'énergie à l'échelle de la ZAC, du quartier…
Un travail peut aussi être effectué sur la rationalisation des voiries.

Pour le rapport entre densité urbaine et consommation d'énergie des bâtiments, il existe un point d'équilibre entre une densité trop faible avec des bâtiment avec une grande surface d'enveloppe potentiellement déperditive et une densité trop importante qui génère des masques solaires (moins d'apports solaires et de lumière naturelle), rend difficile la ventilation traversante et favorise les îlots de chaleur.

Quelle mutualisation des équipements ?

- à l'échelle d'un quartier avec des bâtiments faiblement consommateurs d'énergie, est-il plus pertinent en bilan énergétique global d'avoir un réseau de chaleur ou des systèmes individuels ? Dans le cas du réseau de chaleur alimentant des maisons passives dans l'éco quartier de Kronsberg à Hanovre en Allemagne, les habitants payent un abonnement pour leur raccordement au réseau de chaleur pour des consommations marginales ;
- faut-il mutualiser la gestion des eaux pluviales ou traiter ces eaux à la parcelle ? ;
- quelle mutualisation pour les parkings ? Places pour les bureaux et activités le jour, places pour les résidents la nuit, places réservées au covoiturage, transformation possible de parkings publics en parkings privés et vice-versa ;
- y a-t-il un plan de déplacement existant ? Peut-on favoriser l'accès aux transports en commun existants ? Peut-on en créer ?

33 - Hélène Nessi, « Formes urbaines et consommation d'énergie dans les transports » in La densification en débat, Études Foncières, n°145, mai-juin 2010.

Programmation architecturale

À l'échelle du bâtiment, les enjeux de diminution de l'énergie grise en programmation vont porter sur les économies de matériaux qui sont liées à :

> la mixité fonctionnelle ;

> l'optimisation des surfaces et des volumes ;

> la réhabilitation/réutilisation ;

> l'adaptabilité.

La mixité fonctionnelle

Elle va permettre :

> de diminuer les transports en contribuant à l'implantation de l'ensemble des fonctions sur un espace réduit ;

> d'éviter les vacances de locaux liées à une monofonctionnalité en cas d'évolution des usages. Par exemple : configuration des rez-de-chaussée d'immeubles pour accueillir des logements, des services (micro-crèche…), des activités.

L'optimisation des surfaces et des volumes

Elle passe par une triple réflexion :

> **mutualiser les usages** pour un même local en optimisant l'emploi du temps de l'occupation du bâtiment. Beaucoup d'équipements sont actuellement mono-usage et sous-utilisés sur l'année. Exemples de mutualisation possible en réfléchissant sur les règles de partage :

- un cinéma le soir utilisé en salles de conférence pendant la journée,
- une école en semaine et journée utilisée par des associations le soir et le week-end,
- une cantine d'école peut servir aussi le mercredi et les vacances scolaires pour un centre de loisirs mais peut-être aussi certains week-ends pour des repas d'associations…
- utiliser les salles de formation musicale d'une école de musique (occupées uniquement après 17 h, les lundis, mardis, jeudis et vendredis, les mercredis après-midi et les samedis) pour d'autres types de formations ou des réunions (alphabétisation, recherche d'emploi, formation continue…),
- en Finlande, une crèche le jour devient un foyer pour adolescents le soir.

  Cela suppose de changer radicalement nos modes d'appropriation de l'espace. Par ailleurs, le nombre d'heures d'occupation augmentant, les consommations d'exploitation augmenteraient aussi, ce qui pourrait pénaliser un calcul réglementaire et un affichage de communication. De même, l'entretien et la maintenance seraient plus fréquents, mais l'énergie grise nécessaire à l'accueil de l'ensemble de ces fonctions serait minimalisée du fait de la non construction d'autres bâtiments ;

> **Définir les surfaces et volumes des locaux de manière adaptée aux usages.** Il ne s'agit pas de faire de la réduction de surface à tout prix mais de répondre judicieusement à un besoin. Par exemple :

- dans un équipement scolaire, des circulations spacieuses, parce qu'elles facilitent les flux et évitent les surdensités, créent des espaces moins sonores et moins abîmés[34]. Dans le même esprit, des toilettes spacieuses et lumineuses sont plus propres et durent plus longtemps. Dans les deux cas, on évite un complément d'énergie grise dû à des réparations et à une maintenance fréquentes,
- un travail fin de programmation avec les usagers permet d'identifier les véritables besoins et de dimensionner les locaux de manière appropriée. Par exemple quand on aborde la question des rangements…

34 - Il y a plusieurs années, la direction des lycées de la Région Île-de-France a constaté une corrélation entre le taux de vandalisme et la largeur des couloirs.

> questionner le maître d'ouvrage et les usagers sur la **quantité réellement nécessaire de places de parking et leur localisation.** Une place de parking enterrée coûte cher à la fois en termes d'investissement et en termes d'énergie grise (10 MJ/m^{2}A$_E$.an, soit 2,78 kWh/m^2 A$_E$.an selon la ville de Lausanne). Les alternatives possibles sont, outre l'accès aux transports en commun, la mise en place de covoiturage, l'accès à un service d'auto-partage, des locaux vélos sécurisés ou un parking silo qui pourra disparaître ou être reconverti avec le temps…

La réhabilitation

Elle permet, par rapport à une construction neuve, de récupérer les fondations et le gros œuvre, et donc de faire une économie d'énergie grise de construction et de démolition, sur le chantier, et pour le transport et le traitement des déchets. L'étude *The green building* montre que le gain en émission de gaz à effet de serre entre une construction neuve et une réhabilitation varie entre 7 et 25 %.

On peut aussi, sans réutiliser la totalité du bâtiment existant, se poser la question de réutiliser les fondations qui nécessitent souvent des opérations de démolition très complexes.

L'adaptabilité

C'est la capacité que le bâtiment aura à s'adapter aux évolutions des usages. Elle n'est pas évidente à prévoir. Elle peut tout de même être évaluée par des échanges avec le maître d'ouvrage et les usagers. Par exemple :

> une adaptabilité à l'intérieur d'une même fonction (un musée qui restera un musée mais dont l'organisation spatiale pourra évoluer en fonction du projet scientifique et culturel) ;

> une adaptabilité vers une autre fonction : logement vers bureau ou mini équipement (exemple de rez-de-chaussée d'immeuble), bureau vers logements ;

> une adaptabilité aux évolutions des usagers (handicap, vieillissement…).

Cette capacité d'adaptation doit être évaluée en fonction de la quantité d'énergie grise nécessaire pour permettre cette évolution et la réaliser plus tard en regard de celle nécessaire à une intervention lourde sur un bâtiment non adaptable ainsi qu'en fonction des échéances prévisibles pour cette adaptation.

7.2 – Conception

Dans son ouvrage, « La poubelle et l'architecture »[35], Jean Marc Huyggen écrit : « **La matière grise est l'énergie la moins chère**. Lorsque nous pensons, nous organisons virtuellement la matière physique. La dépense d'énergie du cerveau est infime par rapport à celle qui sera affectée à la construction. Donc plutôt que procéder par essais et erreurs in situ, plutôt que fabriquer et modifier pour que les formes correspondent mieux à l'usage que nous lui destinons, plutôt qu'expérimenter en vraie grandeur, il est plus efficace de commencer à réfléchir avec méthode.

Le cerveau est un économiseur d'énergie : la conception d'un projet est le premier niveau de mise en œuvre de la matière. Le deuxième niveau est l'expression de la pensée : un peu plus d'énergie et de matière utilisée pour faire un croquis. Le troisième niveau est la confrontation avec l'environnement : prendre le point de vue des autres, vérifier les disponibilités et les possibilités, construire un modèle à échelle réduite. Enfin la construction définitive intervient. »

Nous avons identifié 4 axes pour diminuer l'énergie grise à la conception :

> faire une architecture de qualité ;

> limiter la quantité de matériaux par la forme architecturale ;

> choisir des matériaux à faible énergie grise ;

> choisir des principes de mise en œuvre à faible énergie grise.

35 - Jean-Marc Huyggen. La poubelle et l'architecture – Vers le réemploi des matériaux. Éditions l'Impensé Actes Sud. 2008

Faire une architecture de qualité

Une architecture de qualité, c'est à la fois une architecture belle et qui dure.

Faire du beau pour valoriser les utilisateurs, le maître d'ouvrage, les habitants, pour que le bâtiment soit apprécié et entretenu. Les exploitants de systèmes de transport collectifs connaissent bien ce phénomène, une station refaite qualitativement et entretenue de manière régulière est beaucoup moins dégradée qu'un espace laid, sombre qui ne marque pas de considération envers son utilisateur.

Faire du durable, c'est choisir au départ des matériaux et des équipements robustes, de belle facture, qui vont bien vieillir, s'entretenir facilement. La RATP, par exemple a fait le choix de l'acier inox pour certains équipements : c'est un matériau cher mais qui a un bel aspect de surface, résiste à la dégradation et s'entretient facilement.

On peut aussi adopter une stratégie différente qui consiste à investir plus sur la maintenance et le remplacement d'un matériau moins cher et moins durable, par exemple pour un bardage extérieur. Mais dans ce cas, il est fondamental que ce choix de conception soit pris en concertation avec les équipes d'entretien/maintenance et que les budgets nécessaires soient calculés au stade de la conception pour guider les choix.

Limiter la quantité de matériaux par les choix de formes, de principes constructifs et d'esthétique

Raisonner en analyse de la valeur : apporter de l'énergie grise là où il y a un service à rendre et pour chaque choix structurant se poser la question de l'utilité versus l'énergie consommée, l'utilité étant à comprendre au sens large : utilité fonctionnelle, ressentie, maintenance, qualité, long terme…

Efficacité du plan

Au stade de la conception, poursuivre l'effort d'optimisation des surfaces amorcé à la programmation. Par exemple, optimiser le rapport surface utile / surface SHON par une optimisation des dessertes des locaux par les circulations pour ne pas multiplier ces dernières.

Efficacité de la forme

Pour l'énergie grise, il vaut mieux raisonner sur le facteur de forme plutôt que sur la compacité. **Il existe un optimum entre forme du bâtiment et nombre d'étages pour minimiser l'énergie grise.** Selon l'étude de la ville de Lausanne, cet optimum varie en fonction de la taille du bâtiment. Par exemple, l'énergie grise consommée par un bâtiment cubique de 2 000 m² est minimale lorsque celui-ci est organisé en 5 niveaux (Ath/A_E[36] = 1). A contrario, pour un bâtiment de 5 000 m² cet optimum s'observe lorsque le volume est distribué en 7 niveaux (Ath/A_E = 0,73) avec un mode constructif traditionnel.

Dans la recherche d'efficacité de la forme, on peut aussi se poser la question de la hauteur sous plafond. Un compromis est à trouver avec une hauteur :

- adaptée aux usages et aux contraintes : salle de classe/salle de motricité par exemple ;
- avec une rapport surface/hauteur harmonieux ;
- suffisante pour permettre une bonne pénétration de la lumière naturelle et éviter de compenser son insuffisance par un complément de luminaire lui aussi consommateur d'énergie grise puis d'énergie d'exploitation ;
- non surdimensionnée pour éviter la surconsommation inutile d'énergie grise.

Mutabilité

Réfléchir à des principes constructifs permettant une évolution des usages avec des travaux

36 - Ath = surface d'enveloppe, A_E = surface de référence énergétique

d'adaptations faiblement consommateurs en énergie grise.

Quelques exemples :

> la Région Île-de-France, dans la conception de ses lycées, demande que l'ensemble des locaux ait des baies donnant sur l'extérieur de manière à pouvoir réaffecter facilement les locaux ;

> un cloisonnement « mobilier » dans des locaux de travail plutôt qu'un cloisonnement fixe.

On peut aussi réfléchir aux opportunités offertes par des contraintes règlementaires. Par exemple, l'intégration des normes handicapés peut donner lieu à des compléments d'usages pour les utilisateurs non handicapés :

> des toilettes handicapés avec une douche à l'italienne pour des salariés venant en vélo au travail ;

> une rampe handicapés qui sert d'aménagement paysager…

Choix esthétiques

La réflexion sur la diminution de l'énergie grise est aussi l'occasion de **développer une nouvelle esthétique**. Quelques exemples :

> faut-il peindre tous les supports quand on sait que la peinture représente environ 10 % de l'énergie totale de l'ensemble paroi + peinture ? ;

> le bardage bois non traité prend en vieillissant une couleur grise, argentée disent certains qui n'est pas encore forcément acceptée. Pour que cette nouvelle couleur soit harmonieuse, la mise en œuvre du bardage doit prévenir des défauts : bavette au niveau des baies vitrées, lames de bardages plutôt verticales, pas de points de rétention d'eau… ;

> l'utilisation de matière première recyclée ou biosourcée peut induire des aspects de surface particuliers, des couleurs moins uniformes, avec une palette moins étendue ;

> pour la moquette en dalles, InterfaceFlor a développé une gamme à effet patchwork qui permet une pose non-directionnelle. Ce qui se traduit par un taux de chute et des coûts de pose réduits ainsi que par la possibilité en maintenance de ne remplacer qu'une seule dalle à la fois ;

Figure 52 - Moquette en dalle Shadowland de InterfaceFlor

> le réemploi de matériaux, mobiliers ou équipements impose de créer un rapport esthétique satisfaisant entre le « neuf » et le « vieux » pour une bonne acceptabilité par les usagers et les habitants ;

> l'architecte Shigeru Ban travaille avec des matériaux à très faible énergie grise et recyclables : les contraintes de construction, l'aspect et la forme de ces matériaux donnent à ses réalisations une esthétique particulière, par exemple :

- structure en tubes de carton : église de carton à Kobé, pavillon du Japon pour l'exposition universelle 2000 (avec membrane de toiture en papier),
- bambou stratifié : maison meuble en bambou, Shui Guan, Chine.

Choisir des matériaux à faible énergie grise

Après avoir optimisé le parti architectural du bâtiment, une analyse fine de la répartition de l'énergie grise par composant (structures horizontales et verticales, façade, menuiserie, revêtement sol, etc.) permet de continuer le processus de diminution de l'énergie grise.

Choisir des matériaux à partir des données sur leur énergie grise

Quelques ordres de grandeur :

Le graphique ci-dessous compare le contenu en carbone des principaux matériaux de construction. Même si les données de ce type ne peuvent être utilisées brutes, et qu'il faut les ramener à une unité fonctionnelle du bâtiment, par exemple 1 m² de paroi, il présente l'intérêt de visualiser rapidement des impacts.

Comparaison entre une charpente acier et une charpente en bois lamellé-collé et bois traditionnel à partir des FDES pour une durée de vie typique de 100 ans.

	Charpente acier	Charpente en bois lamellé-collé et bois traditionnel	Écart acier/bois
Énergie primaire totale	52 kWh/m²	55 kWh/m²	-5 %
Énergie matière	0 kWh/m²	27 kWh/m²	
Énergie procédé	52 kWh/m²	28 kWh/m²	+ 46 %

Centre d'exploitation d'autocars et d'autobus pour TRANSDEV à Bailly Romainvilliers – Source AILTER (AMO HQE)

Si l'on ne regarde que l'énergie primaire totale, alors la charpente métallique est plus intéressante, mais lorsque l'on s'intéresse à l'énergie procédé alors on voit que l'énergie primaire de la charpente métallique est uniquement de l'énergie procédé, soit de l'énergie « perdue » et que le choix de la charpente bois fait faire une économie de 46 % d'énergie grise au sens de la définition de l'ICEB.

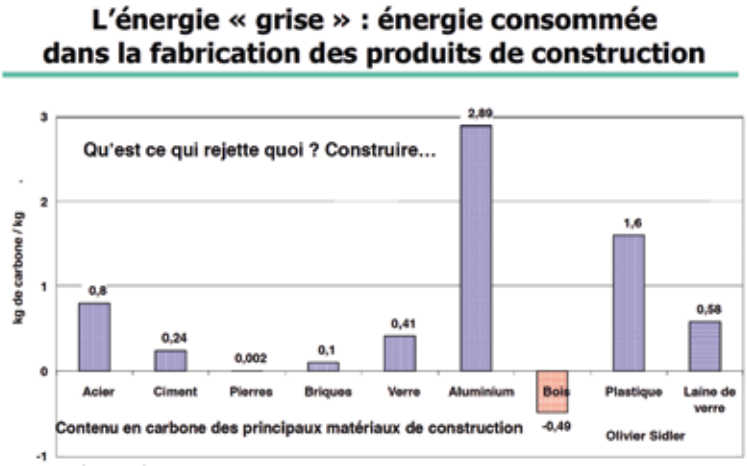


Figure 53 - Impact carbone de matériaux de construction - Source : ENERTECH

Figure 54 - Centre d'exploitation d'autocars et d'autobus pour TRANSDEV à Bailly Romainvilliers – Architecte : NEX – Vue intérieure de l'atelier – Photo : Bruno Plassé

Revêtements de façade

Selon les fiches techniques de l'ALE, Agence Locale de L'énergie de l'agglomération lyonnaise, lorsqu'une façade en tôle d'aluminium consomme 70 370 kWh/tonne d'énergie grise, en torchis ce besoin n'aurait été que de 20 kWh/tonne. Ces données ne peuvent être utilisées brutes et sont à transformer en unités fonctionnelles. De plus, une maison en torchis ne peut pas être construite partout pour des raisons de main d'œuvre, de savoir-faire et de disponibilité de la matière première.

La base de données Ecoinvent est utilisée pour faire des éco-devis[37] qui permettent de comparer différentes possibilités de réaliser la même fonction. Voir la figure 55 pour les revêtements métalliques extérieurs.

Certains matériaux sont particulièrement consommateurs d'énergie et il convient de les éviter, ou de diminuer leur quantité en les réservant aux parois où ils servent une fonction : polycarbonate lorsqu'il permet d'apporter de la lumière et que du vitrage serait trop lourd, tôle de zinc lorsqu'il y a une mise en forme qui nécessite la souplesse de ce matériau…

Choisir des matériaux fabriqués à partir de matière première recyclée

La matière première recyclée a déjà été transformée donc on ne compte pas une deuxième fois son énergie procédé sauf pour la part de l'énergie procédé qui correspond à la mise en œuvre de cette matière dans le nouveau produit. On économise donc de l'énergie procédé en plus de l'énergie matière.

De nombreux fabricants intègrent des matières premières recyclées dans leurs produits pour des raisons à la fois économiques, de raréfaction de la matière première et environnementales :

- dalles de moquettes dont la sous-couche et la couche supérieure sont à base de matière première recyclée ;
- pour les métaux, dans la fabrication classique, un pourcentage important de matière recyclée est déjà inclus, en moyenne : 30 % pour le zinc manufacturé, 47 % pour l'acier moyen européen, 30 % pour l'aluminium moyen européen ;
- les pneus usagés et broyés sont utilisables en fossés drainants, en remblai, en mur antibruit, en sol souple autour des jeux d'enfants ;

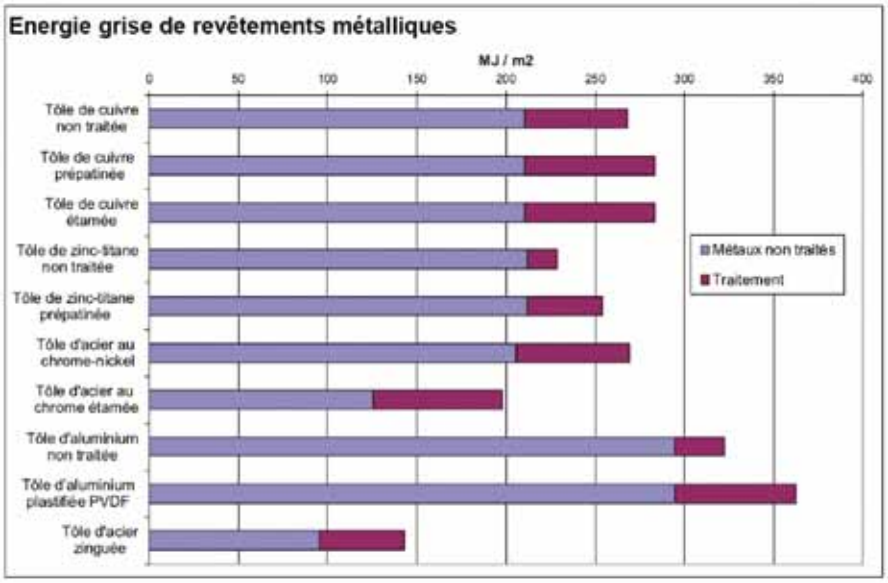


Figure 55 - Énergie grise des revêtements métalliques - Source : éco-devis 343 édité par l'association de soutien eco-devis - juin 2008

37 - http://www.eco-bau.ch/index.cfm?ID=16&Nav=15&js=1

> certains isolants thermiques sont composés de verre recyclé provenant principalement de verre plat et de vitres de voitures. Lors du remplacement, ces isolants peuvent être réutilisés comme matériau de remblayage dans l'aménagement paysager ou comme matière de remplissage pour les écrans anti-bruit ;
> l'association Emmaüs ne peut revendre que 40 % des vêtements qu'elle reçoit. Avec les 60 % restant, principalement des jeans, mélangés à des fibres thermofusibles, elle a développé un isolant thermique et acoustique reconnu, sous forme de panneaux et rouleaux, appelé Métisse® ;
> l'isolant, ouate de cellulose, est composé dans sa très grande majorité de papier journal recyclé.

Faire du réemploi

Utiliser des matériaux, équipements ou objets mis au rebut pour les intégrer dans une opération de construction neuve ou de réhabilitation.

Jean-Marc Huyggen dans son livre « La poubelle et l'architecture »[37] donne la définition suivante du réemploi : « La notion de réemploi contient donc à la fois les notions de réutilisation, de récupération et de recyclage : l'objet obsolète n'est pas abandonné au profit d'un nouvel objet de consommation. Mais en plus, elle induit des notions de civilisation : l'objet réemployé sert à créer le cadre de la société de maintenant, tout en gardant la mémoire du passé. »

Exemples d'opérations :

> utilisation de conteneurs : le premier Musée Nomade (Nomadic Museum), réalisé par l'architecte Shigeru Ban était construit à partir de 152 conteneurs de marchandises, empilés en 4 étages en combinaison avec des matériaux recyclables pour créer les éléments structurants ;
> utilisation de 550 balles de papier et de cartons recyclés pour la réalisation d'un bâtiment de conférences et concerts (PHZ2) à Essen en Allemagne (2008-2010). Dratz und Dratz Architekten ;
> utilisation de débris de chantier :
  - l'architecte Wang Shu, lauréat du prix Priztker 2012 et du prix de l'architecture durable en 2007, se distingue par ses réalisations qui réutilisent des débris de chantier, de briques ou de tuiles,
  - sur un chantier-école initié par le Plan Roubaisien d'Insertion où 6 personnes travaillaient en contrat-emploi-solidarité, la « Baraque » de chantier de la Condition publique a été construite en majorité avec des matériaux et équipements que les entreprises s'étaient vu refuser sur d'autres chantiers. Sur le sujet de la mutualisation, cette « Baraque » fut, de septembre 2003 à mars 2004, un lieu ouvert au public qui pouvait venir y boire une soupe, voir une exposition ou écouter un concert entre voisins, architectes, ouvriers, ou salariés de la Condition Publique.

Exemples de matériaux, mobiliers :

> utilisation d'éléments issus de la démolition des bâtiments existants :
  - en VRD, les entreprises réutilisent les terres excavées dans d'autres chantiers où des apports de terre sont nécessaires,
  - les gravats issus de la démolition puis concassés peuvent être utilisés en remblai ou comme granulats de béton.
> utilisation de mobilier ancien : en plus d'une économie d'argent et d'énergie, il y a un avantage santé : si les matériaux contiennent des COV, ils ont eu le temps de les émettre et leur niveau d'émission est devenu très faible, voire nul.

Choisir des matériaux biosourcés

Les matériaux biosourcés sont des matériaux d'origine végétale ou animale : bois et ses dérivés, chanvre, paille, plume, laine de mouton… La matière dont ils sont issus est renouvelable et, pour les matériaux d'origine végétale, ils peuvent contribuer à la

réduction des émissions de gaz à effet de serre et au stockage temporaire de carbone. Leur énergie grise est variable selon les types de procédés mis en œuvre. Quelques valeurs issues de la banque de données du logiciel COCON :

Matériaux	Énergie grise d'origine non renouvelable (kWh/m³)
Bois léger brut, séché à l'air (sapin, épicéa)	332
Bois léger, raboté, étuvé (sapin, épicéa)	610
Bois lourd (hêtre, chêne)	560
Laine de chanvre, lin, coton	336
Laine de mouton et autres fibres animales	252
Plumes de canard	268

Choisir des matériaux locaux

Le transport, et particulièrement le transport routier, représente une part importante de l'énergie grise consommée notamment avec le transport routier :

- favoriser des matériaux provenant de lieux de fabrication « proches » du bâtiment, soit dans un périmètre de 500 km ;
- favoriser des modes de transports moins impactant comme la voie ferrée et le transport fluvial ;
- favoriser le transport terrestre par train plutôt que par camion ;
- pour des bâtiments à proximité d'un port, ne pas exclure le recours à des matériaux lointains s'ils sont approvisionnés par bateau.

Choisir des matériaux locaux permet par ailleurs de développer les filières locales (savoir-faire et emplois) et de s'inscrire dans une esthétique contemporaine en harmonie avec le paysage et l'architecture vernaculaire.

Le cas des panneaux photovoltaïques

Certaines solutions techniques sont gourmandes en énergie grise dès le démarrage de leur cycle de vie. Par exemple, la fabrication de 200 m² de panneaux photovoltaïques nécessite 265 000 kWh d'énergie. Pour des panneaux à cellules polycristallines, on estime à 2 à 4 ans, le temps de fonctionnement nécessaire pour que soit rentabilisée l'énergie utilisée pour la fabrication (panneaux garantis aujourd'hui 20 ans par les fabricants). Ce temps est jugé plus court pour les panneaux composés de modules photovoltaïques amorphes, entre 15 à 18 mois.

L'étude réalisée par *l'International Energy Agency-Photovoltaic Power System Programme, l'European Photovoltaic Technology Platform et l'European Photovoltaic Industry Association* et intitulée « Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities », donne les conclusions suivantes :

Paris	Global horizontal irradiation 1057 kWh/m²	
	Roof-top	Façade
Annual output [kWh/kWp]	872	595
Energy Pay-Back Time [years]	2,90	4,25
Energy Return Factor [number of times]	9,4	6,1
Potential for CO_2 mitigation [tCO_2/kWp]	2,095	1,428
Lyon	**Global horizontal irradiation 1204 kWh/m²**	
	Roof-top	Façade
Annual output [kWh/kWp]	984	632
Energy Pay-Back Time [years]	2,57	4,00
Energy Return Factor [number of times]	10,7	6,5
Potential for CO_2 mitigation [tCO_2/kWp]	2,364	1,518
Marseille	**Global horizontal irradiation 1540 kWh/m²**	
	Roof-top	Façade
Annual output [kWh/kWp]	1 317	878
Energy Pay-Back Time [years]	1,92	2,88
Energy Return Factor [number of times]	14,6	9,4
Potential for CO_2 mitigation [tCO_2/kWp]	3,163	2,108

Figure 56 : Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities, International energy agency photovoltaic power systems programme. ADEME, May 2006. 54 pages.

Un module en toiture à Lyon a, par exemple, une équivalence de 80 g éq CO_2 par kWh final. Ce résultat s'obtient en divisant les émissions liées à la fabrication du module par le nombre de kWh produits.

Plus on descend dans le Sud de la France, plus la mise en place de panneaux photovoltaïques devient naturellement rentable. Le temps de retour sur investissement est donc plus rapide.

Actuellement, la gestion en fin de vie de ces panneaux (après 25-35 ans de durée de vie) est problématique en raison du manque d'usine de traitement de ces déchets en France. Cependant des associations telles que PV CYCLE (http://www.pvcycle.org) récupèrent gratuitement les panneaux et organisent leur recyclage. Actuellement PV CYCLE et ses partenaires récupèrent un pourcentage important de verre, de métaux ferreux et non ferreux utilisés dans ces modules solaires. Leur but affiché est d'atteindre un taux de recyclage de 80 % avant 2015 et 85 % avant 2020.

Choisir des principes de mise en œuvre à faible énergie grise

Comparaison entre préfabrication et fabrication sur site

Opération Maison de Quartier pour la ville de Bourg-La-Reine – Source AILTER (AMO HQE)

Comparaison entre l'énergie primaire totale d'un plancher de type poutrelle-hourdis et un plancher traditionnel coffré pour les planchers hauts en intégrant les isolations thermiques à partir des FDES sur une durée de vie de 50 ans :

> plancher de type poutrelle-hourdis : 126 kWh/m²

> plancher traditionnel coffré : 172 kWh/m²

Le plancher traditionnel présente une consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre de 37 % supérieures à la solution poutrelles-hourdis, écart équivalent à 14 mois de consommation d'énergie en exploitation de l'équipement (calculée avec l'outil règlementaire).

Jouer avec le calepinage

> calepiner les matériaux pour avoir le moins de chutes possibles : revêtements de sol, de façades, faux plafonds ;

> choisir le revêtement de façade en fonction de ses dimensions pour correspondre au mieux à celles des façades ;

> adapter les dimensions des façades et la position des ouvertures au module des éléments de mur ou de parement utilisés (coordination dimensionnelle).

Choisir des systèmes de pose permettant la séparabilité des matériaux en fin de vie

> s'il est aujourd'hui, facile de valoriser les produits de démolition des bâtiments à structure béton ou à structure métallique, cela reste en revanche très compliqué pour les bâtiments à structure mixte ou pour les panneaux sandwiches ;

> poser les revêtements de sol avec de l'adhésif plutôt que de la colle : la dépose est facilitée, il n'y a pas de colle sur le revêtement et on peut donc le recycler ou, a minima, ne pas l'envoyer en déchets dangereux à cause de la colle ;

> le plâtre est la « plaie » du recyclage car ce n'est pas un déchet inerte, mais un DIB[38]. Il est lourd, difficile à déposer, à séparer, et il n'a pas de filière de recyclage, même si des essais ont déjà été réalisés. En revanche, les fabricants de plaques de plâtre cartonnées commencent à mettre en place des filières de collecte pour alimenter leurs ateliers de recyclage.

7.3 – Réalisation

La consommation d'énergie sur le chantier

Il est possible de collecter des données précises liées à la réalisation sur le chantier : consommations d'électricité et d'eau, de carburant pour les engins de chantier, les outils et équipements techniques, et pour le groupe

38 - Il doit de plus être stocké au sec et sans contact avec des déchets fermentescibles avec lesquels il peut réagir chimiquement pour dégager de l'hydrogène sulfuré, gaz toxique et explosif.

électrogène éventuel. On peut aussi compter en complément les consommations d'énergie pour la base vie, le transport des matériaux, matériels et engins, des déchets, du personnel.

Exemples de bilans d'énergie sur chantier - Source AILTER :

- Centre d'exploitation d'autocars et d'autobus pour TRANSDEV à Bailly-Romainvilliers : construction d'un bâtiment de bureau de 1848 m^2_{SHON} (structure béton) et d'un atelier de 1 345 m^2_{SHON} (structure bois), durée du chantier 10 mois : consommation totale (hors travaux VRD) : 39 300 kWhef d'électricité, soit une moyenne mensuelle de 3 010 KWhef. **La consommation du chantier correspond à 3 mois de la consommation des deux bâtiments en exploitation** calculée avec les outils de calcul réglementaires ;
- maison de quartier pour la ville de Bourg-la-Reine de 711 m^2_{SHON} (structure béton), durée du chantier 14,5 mois: consommation totale (avec travaux VRD) : 92 830 kWhef d'électricité, soit une moyenne mensuelle de 6 400 KWhef. **La consommation du chantier correspond à 3 ans de la consommation du bâtiment en exploitation** calculée avec les outils de calcul réglementaires.

La différence entre ces deux opérations (consommation mensuelle deux fois plus élevée pour la maison de quartier) : peut s'expliquer par les points suivants pour la maison de quartier :

- l'alimentation en eau du chantier était faite par un tuyau extérieur équipé d'un cordon chauffant pour éviter le gel ;
- les travaux de VRD sont compris dans le bilan énergétique ;
- les travaux ont commencé en hiver dans des conditions rudes et des températures très basses ;
- la maison de quartier a commencé à fonctionner sur l'alimentation du chantier à cause d'un retard d'EdF pour l'alimentation de l'équipement !

En conclusion, l'énergie consommée sur le chantier est à surveiller même si sa part reste faible dans le bilan total d'énergie grise de l'ouvrage, et ceci pour :

- éviter des surconsommations pas nécessairement visibles à première vue ou qu'un autre type d'organisation pourrait permettre d'éviter ;
- favoriser les modes de transports doux (pour les déplacements de personnes, transports en communs, covoiturage, vélo) et de matériaux et équipements (voies fluviales, ferroutage, etc.) ;
- sensibiliser les acteurs du chantier.

Se servir des accidents de fabrication comme source d'inspiration

- Pour l'école du centre de Pantin, l'architecte Méandre a proposé à l'entreprise qui a réalisé les parois en béton des escaliers de ne pas reprendre l'ensemble du béton lorsqu'il y avait des défauts, ni de tout recouvrir d'enduit mais de faire des patchs en enduit à la Mondrian ;

Figure 57 – Escalier béton bois, architecte : Méandre – Photo : Olivier Wogenscky

Figure 58 – Patch ciment sur béton, architecte : Méandre – Photo : Marie-Pierre Goguet

- pour la réalisation du parc Güell et de la Casa Pedrera, l'architecte Antonio Gaudi s'est appuyé sur les artisans qui ont apporté leur note personnelle à partir de ses instructions mais aussi à partir des matériaux utilisés (éléments trouvés sur le site, déchets de céramiques ou de verre réemployés) ;
- dans le cas de problèmes de pose sur un revêtement de sol, faut-il tout déposer (parce que la teinte du bain est légèrement différente) ou peut-on imaginer des « rustines » qui vont créer un dessin ?

Se donner les moyens de faire bien

Les défauts de fabrication induisent soit des déposes et des réfections complètes ou partielles, soit des désordres à long terme. Autant de postes consommateurs d'énergie.

Pour les éviter :

- choisir des entreprises compétentes avec un véritable savoir-faire et travailler avec les compagnons sur le chantier pour optimiser le projet. Retenir le mieux disant plutôt que le moins disant ;
- prévoir un temps suffisant pour le séchage, la pose, la réflexion… Revaloriser le travail manuel, l'intelligence et le temps qu'il faut pour le faire bien.

7.4 – Exploitation

Optimisation des consommations d'énergies grises pour :

- la maintenance ;
- l'entretien ;
- le renouvellement des matériaux et équipements : choix de produits à faible énergie grise et de systèmes de pose permettant la séparabilité pour la valorisation en fin de vie ;
- par la remise en question de l'esthétique : accepter les réparations plutôt que de refaire à neuf une façade, un revêtement de sol…

7.5 – Fin de vie

5 scénarios sont possibles en fin de vie pour les constituants du bâtiment :

- l'élément est envoyé à la décharge pour y être enfoui ;
- l'élément est valorisé énergétiquement ;
- l'élément est valorisé pour sa matière (métal, bois, béton…) ;
- l'élément est récupéré et stocké temporairement pour être réutilisé sur un autre chantier ;
- l'élément est récupéré pour être utilisé sur place.

Aujourd'hui, selon Félix Florio[39], en démolition/curage on atteint en moyenne 50 à 70 % de valorisation de déchets, 15 à 30 % pour les chantiers de construction neuve. La directive cadre européenne vise 70 % de valorisation pour tout type de chantier de bâtiment.

Les dispositions à mettre en place :

- se reposer la question de la phase programmation : réhabiliter ou construire du neuf en totalité ou en partie ?
- faire faire un diagnostic déchets, obligatoire depuis le 1er mars 2012[40] pour tous les bâtiments de plus de 1 000 m² de SHOB ou ayant accueilli une activité agricole, industrielle ou commerciale et ayant été le siège d'une utilisation, d'un stockage, d'une fabrication ou d'une distribution d'une ou plusieurs substances dangereuses. Il fournit :

39 - Consultant indépendant, membre de l'ICEB, expert auprès de la FFB pour la gestion des déchets de chantier du BTP

40 - Décret n° 2011-610 du 31 mai 2011 relatif au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments

- la nature, la quantité et la localisation dans l'emprise de l'opération de démolition :
  - des matériaux, produits de construction et équipements constitutifs des bâtiments,
  - des déchets résiduels issus de l'usage et de l'occupation des bâtiments.
- et également :
  - des indications sur les possibilités de réemploi sur le site de l'opération,
  - l'estimation de la nature et de la quantité des matériaux qui peuvent être réemployés sur le site,
  - à défaut, des indications sur les filières de gestion des déchets de démolition,
  - une estimation de la nature et de la quantité des matériaux de démolition à valoriser ou éliminer,

> exiger le respect d'une démarche de chantier à faibles nuisances pour la déconstruction avec un tri sélectif ;

> identifier les filières de recyclage locale, avec des entreprises d'insertion, mises en place par des fabricants ou des groupements de fabricants. Par exemple, la société InterfaceFlor dépose et récupère les moquettes du type sous-couche bitume pour les recycler dans la fabrication de ses produits, Desso fait de même avec certains de ses produits ;

> réutiliser les fondations existantes.

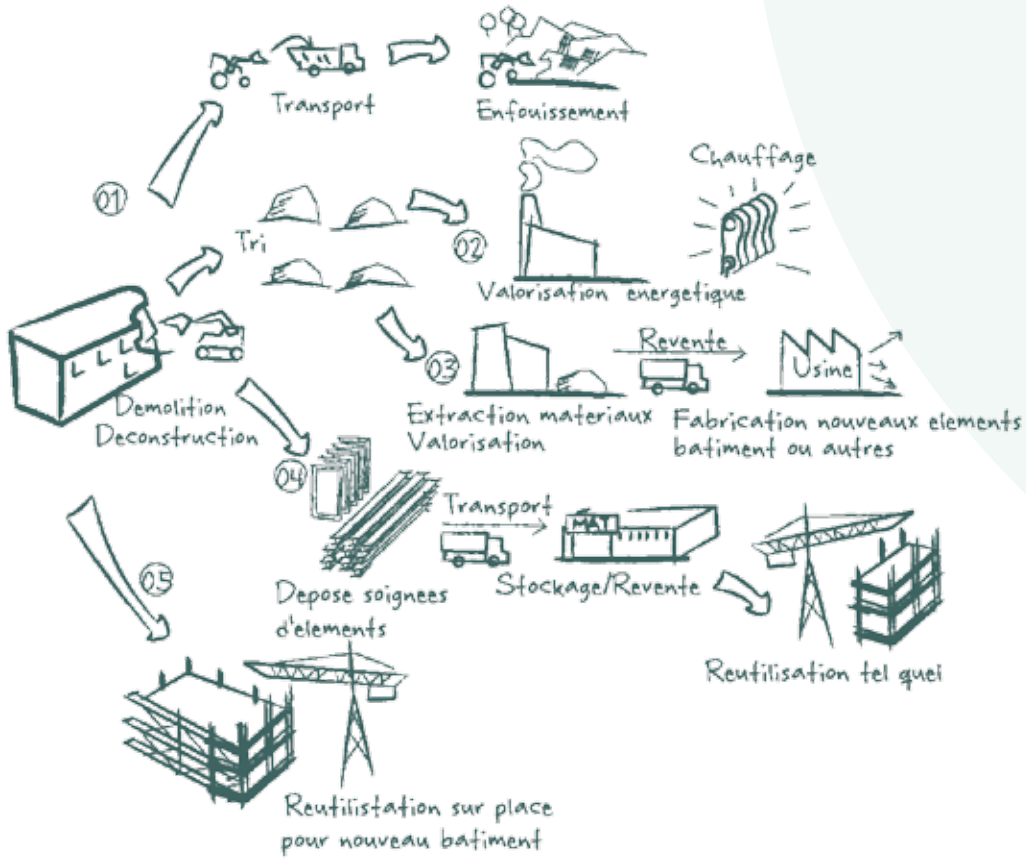


Figure 59 - 5 scénarios après la démolition - Source GT ICEB

7.6 – Deux exemples d'optimisation de l'énergie grise

La façade en craie du bâtiment est abimée : fenètres murées, percement pour la ventilation des sanitaires, pierres endommagées. Le mur de clôture sur lequel s'appuyaient les appentis démontés est hétérogène : craie, brique, terre crue.

Un échaffaudage de maçon est installé entre les parties à démolir et à conserver pour faciliter la manutention : les pierres sont prélevées et réinstallées au même niveau (pas d'engin).

UNE HISTOIRE D'ENERGIE GRISE

Restructuration d'une ancienne bâtisse en maison des associations à Châlons-en-Champagne

Le mur à démolir est utilisé comme carrière pour récupérer les blocs de craie et réparer les façades et la partie conservée du mur.

Le mur carrière après prélèvement va être démoli.

La façade réparée.

Le charpentier choisit les chablis issus de la tempête de 1999 dans la forêt voisine pour faire les poteaux de reprise de la poutre. Ces troncs de chêne seront juste écorcés et brossés.

Derrière l'enduit, les pans de bois contiennent un remplissage de mottes de terre et paille. On y voit la trace des mains des façonneurs. Les poteaux portent des traces d'anciens assemblages, signe qu'ils sont eux-même issus de la récupération.

La rue intérieure terminée.

Figure 60 – Architecte : Méandre – Photo : Luc Boegly, Valérie Pasquet

Extraction de l'argile directement du sol devant à construction. Façonnage des briques de terre crue. Fabrication des tuiles canal au tour, séchage au soleil. 2 cuissons (terre et émail).

ENERGIE GRISE proche de zéro

Architecture en terre au Maroc

Les bâtiments sont totalement intégrés dans le paysage.

Murs en terre crue, planchers et toiture en poutres bois et cannes issues de cultures locales. Avantages : autoconstruction, matériaux locaux " gratuits ", masse thermique, déphasage jour/nuit, régulation hygrométrique.

Déconstruction " naturelle " : si le bâtiment est abandonné, il fond et la terre retourne à la terre.

Inconvénients : entretien permanent, fragilité aux intempéries, précarité.

Petit à petit, les constructions traditionnelles en terre sont remplacées par des construction en parpaing avec un enduit couleur terre. Commercialisation, perte de savoir-faire, esthétique appauvrie, mais pour les habitants être dégagé du travail d'entretien/réparation des constructions.

Figure 61 – Photos : Emmanuelle Patte

POINTS À RETENIR

1 - Programmation

- En programmation urbaine, travailler la densité pour limiter l'étalement urbain en créant un véritable cadre de vie avec une mixité fonctionnelle et sociale et des « respirations » pour les activités récréatives afin d'éviter de générer des transports supplémentaires des habitants pour « s'évader » ;
- en programmation architecturale, favoriser la mixité fonctionnelle, la mutualisation des usages, optimiser les surfaces et volumes par rapport aux usages et à la qualité des espaces, limiter le nombre de places de parking, se poser la question de la réhabilitation plutôt que de la construction neuve, réfléchir à l'adaptabilité du bâtiment.

2 - Conception

- Prendre le temps de la réflexion. Faire une architecture de qualité, belle pour qu'on s'y sente bien et qu'on ait envie de la conserver, et durable par ses matériaux et sa robustesse ;
- limiter la quantité de matériaux à mettre en œuvre par :
  - une efficacité du plan, de la forme (rapport surface/volume qui optimise les volumes de matériaux),
  - des principes constructifs permettant des évolutions des usages,
  - des choix esthétiques (ne pas peindre, accepter qu'un revêtement de façade change de couleur dans le temps – bardage bois…) ;
- Choisir des matériaux à faible énergie grise : comparer des matériaux avec les bases de données, utiliser des matériaux fabriqués à partir de matières premières recyclées, des matériaux biosourcés, faire du réemploi (de matériaux issus de la démolition, de mobilier, de produits non utilisés sur un autre chantier…), rechercher des matériaux locaux ;
- choisir des principes de mise en œuvre à faible énergie grise : préfabriquer en usine plutôt que sur site, calepiner en fonction des surfaces et des produits, choisir des principes de pose permettant la séparabilité des matériaux en fin de vie pour permettre leur recyclage.

3 - Réalisation

- Être attentif à la consommation d'énergie sur le chantier, dans une démarche globale de chantier à faibles nuisances ;
- convaincre le maître d'ouvrage de l'intérêt de se donner et de donner le temps de bien faire pour éviter les malfaçons et les reprises ;
- utiliser les accidents de fabrication comme source d'inspiration plutôt que de tout faire refaire.

4 - Exploitation

- Le choix et la mise en œuvre des matériaux et équipements de remplacement des éléments en fin de vie ou dégradés doivent être effectués avec le même soin et les mêmes exigences en énergie grise que ceux des éléments d'origine ;
- sensibiliser le maître d'ouvrage et les usagers et rechercher avec eux des solutions de type « rustine » esthétiquement acceptables pour éviter par exemple de devoir refaire à neuf tout un revêtement.

5 - Fin de vie

- Faire un diagnostic déchets avant la démolition et rechercher des solutions de valorisation matière pour un maximum de déchets, soit sur place, soit dans des filières appropriées avec le moins de transformation possible.

Kapelle der Versöhnung « La chapelle de la réconciliation » à Berlin. Architectes : Sassenroth et Reitermann. Photographe : François Lecerf.

8. Comment réduire l'énergie grise

Comment réduire l'énergie grise sans négliger les autres impacts d'un bâtiment (psychologiques, culturels, esthétiques, sanitaires, sociaux, sensoriels, subjectifs, historiques…) ?

Chercher à réduire les consommations d'énergie grise d'un bâtiment est assez similaire à la recherche d'économies financières dans un budget.

Quand on veut réduire les dépenses, on supprime d'abord ce que l'on juge inutile, luxueux ou superflu.

Attention ! En croyant aller droit au but on risque d'oublier tous les autres paramètres. Voici quelques recommandations et pistes de questionnement pour ne pas tomber dans une attitude de comptage méticuleuse et réductrice et se servir de cet objectif pour ajouter de la valeur à l'opération :

> prendre le **temps** de la réflexion, ne pas céder au sentiment d'urgence ;

> investir de la **matière grise**, changer de point de vue, prendre du recul, garder un esprit critique, curieux et ouvert ;

> la façon de faire le calcul dépend de la question que l'on pose. Ne pas laisser les décisions aux seuls spécialistes. Regarder ce qu'il y a **derrière les chiffres**, ne pas avoir peur de questionner les calculs, le périmètre, la pertinence des chiffres, de leur précision. Ne pas se laisser impressionner par les mots savants. Questionner ce que l'on ne comprend pas ;

> réinterroger son **besoin**. Ce qui semble indispensable ne l'est pas forcément, explorer des solutions radicalement différentes ;

> clarifier son **désir**, s'offrir le luxe de choses très belles, coûteuses peut-être en énergie mais que l'on va aimer, soigner et garder longtemps plutôt que du « jetable » ;

> changer son **regard** : ce vieux bâtiment « daté » peut être transformé, redevenir désirable. À force d'habitude, parfois, on ne voit pas la **valeur** des choses. Revaloriser une architecture par un regard extérieur, inviter un critique à parler des qualités de ce bâtiment, un photographe à faire des images, se **souvenir** de son histoire… ;

> être **inventif**, changer de point de vue. Parfois, il vaut mieux retirer tout un poste de dépense plutôt que de le réduire et cela donne la marge pour bien faire un autre élément du bâtiment. Faire moins mais mieux ;

> intervenir **judicieusement** sur les éléments qui ne fonctionnent pas bien plutôt que de faire table rase ;

> prendre du plaisir au **questionnement**, à la recherche d'économie. La contrainte est source de créativité. La pénurie est source d'invention ;

- ne pas économiser sur les éléments de **confort** acoustique, visuel, hygrothermique, olfactif, ni sur les questions de santé, qualité de l'air, émanations de substances nocives. Car ces économies entraineront des dépenses : absentéisme, pathologies, conflits… réelles bien que non comptabilisées dans les mêmes budgets. Le problème de la prévention : si c'est bien fait, ça ne se voit pas, on n'en parle pas ;
- réfléchir en **coût énergétique global**, regarder les conséquences à long terme d'un moindre investissement en énergie grise. La santé, l'éducation ne semblent pas lucratives. Pourtant les négliger entrainera des coûts futurs bien plus importants. Par exemple l'accompagnement des usagers permettra une meilleure appropriation du bâtiment, un usage plus respectueux et donc des économies en travaux futurs évités ;
- le **plaisir sensoriel**, la satisfaction esthétique, la dynamique du corps dans un espace ont des impacts positifs sur les habitants, les usagers ;
- considérer les équilibres sociaux, valoriser les **savoir-faire** qui enrichissent culturellement ceux qui les exercent. À quoi bon appauvrir en économisant et finalement contribuer à une perte du goût du travail, une dévalorisation des métiers techniques, de l'habileté manuelle (ce qui entraine d'autres coûts sociaux psychologiques, de santé…) ?
- ne pas renoncer aux **échanges** y compris internationaux, au plaisir de certaines **matières exotiques** utilisées à bon escient, à leurs spécificités, qualités, au plaisir du commerce, de la découverte d'autres **cultures**, du voyage. Ne pas exclure sans raisonner ;
- privilégier la **diversité** des solutions, se méfier des monopoles qui détruisent le **maillage local et global** des approvisionnements, des compétences (exemple : le lamellé-collé est forcément fabriqué dans une usine équipée tandis que certaines autres techniques d'assemblage de petites sections du bois peuvent être mises en œuvre par n'importe quel charpentier avec un marteau et des clous) ;
- faire les choses à la bonne échelle, à la bonne solidité. Faut-il construire en dur quand une **structure légère** répondrait aux besoins. Exemple : marchés forains, théâtre itinérant, camp de vacances, structure démontable. Réfléchir aussi à la remise en état d'origine du terrain, du paysage après usage ;
- allier **low tech et high tech**. Certains systèmes manuels sont finalement plus efficaces, plus satisfaisants pour l'utilisateur que des système automatiques. Par exemple, pour certains usages, ventilation par ouverture des fenêtres plutôt que ventilation mécanique avec interdiction d'ouvrir les fenêtres et capteurs… ;

- appliquer le **principe d'expérimentation** : tester à petite échelle les idées, les matériaux nouveaux, les techniques présentées comme solutions miracles pour pouvoir les corriger facilement ;
- **se remémorer l'histoire** des progrès techniques, comprendre les raisons des évolutions ;
- penser **planète**, globalement. Si nous donnons (ou vendons) nos vieux équipements polluants aux pays du tiers monde ou aux pauvres du quartier qui vont polluer tout autant que nous le faisions, ceci afin de réaliser une opération exemplaire, quel intérêt pour la planète ?
- transgresser les habitudes, les interdits obsolètes (par exemple des systèmes de sécurité redondants), **questionner les blocages** réglementaires, sécuritaires, commerciaux, syndicaux, normatifs. Utiliser les déchets comme matériaux de construction même si l'on ne connaît pas leur provenance mais s'assurer de leur innocuité ;
- donner le **pouvoir aux utilisateurs**. On accepte les économies que l'on choisit, pas celles qui vous sont imposées.

POINTS À RETENIR

Sauver la planète c'est avant tout sauver l'humanité

Construire un bâtiment est un **acte culturel** au service de ses habitants et usagers. Plonger dans les questions d'énergie ne doit pas nous faire oublier les questions humaines.

Quartier durable – Hammarby – Stockholm – Suède Crédit ARENE Île-de-France - IMBE

9. Conclusion et perspectives

9.1 – Des outils et méthodes à développer et à s'approprier

L'analyse que nous avons pu faire des bases de données et outils disponibles montre que nous avons encore affaire à des bases de données incomplètes et à un foisonnement d'outils qui correspondent à un **sujet encore jeune**. L'évolution de ces éléments et de leur usage est sous la **responsabilité de chacun des acteurs de la construction :**

- les **maîtres d'œuvre et assistants à maîtrise d'ouvrage** qui doivent faire un véritable travail d'analyse pour identifier les bases de données et outils les plus fiables et les plus pertinents pour leurs opérations, apprendre à les utiliser et les utiliser effectivement. La partie 6 de ce guide a réalisé ce travail long et pointu pour permettre à nos lecteurs de faire un choix rapide en toute connaissance de cause. Ils doivent aussi inciter les industriels à fournir les informations sur leurs produits et faire parfois des choix délicats entre des produits avec des données environnementales disponibles, mais pas toujours vérifiées et des produits innovants ou artisanaux sans aucune donnée d'impact environnemental ;
- les **fabricants** qui doivent prendre conscience qu'il est essentiel d'œuvrer sur l'ensemble des consommations et fournir des données environnementales fiables sur leurs produits ;
- les **pouvoirs publics** : fournir une Fiche de Déclarations Environnementales et Sanitaires n'est pas obligatoire. Quand cela le sera-t-il ? De plus, il y a aussi une question d'équité et d'aide au développement des filières économes en énergie grise : tous les fabricants n'ont pas forcément les moyens financiers de réaliser ces fiches. Enfin, quand la valeur d'énergie grise devra-t-elle être affichée au même titre que la consommation en exploitation ?
- les **usagers** qui doivent accepter des critères esthétiques nouveaux, la mise en commun d'espaces ;
- les **maîtres d'ouvrage** qui doivent fixer des exigences et donner les moyens, surtout en temps et en réflexion, de les atteindre.

9.2 – L'énergie grise dans les labels et la réglementation : ça commence !

Certains maîtres d'ouvrage incluent des objectifs chiffrés pour l'énergie grise dans leurs cahiers des charges. Par exemple :

- la Ville de Lausanne pour le quartier durable des Plaines-du-Loup : 100 MJ/m^{2}A$_E$.an pour les bâtiments neufs logements ou bureaux, soit 2 224 kWh/m^{2}A$_E$ sur les 80 ans de durée de vie de ces bâtiments ;
- la Région Bourgogne dans son appel à projet de 2008-2009 sur les bâtiments à faible empreinte écologique : de 1200 à 1500 kWhep/m^2 selon les performances énergétiques visées pour les bâtiments.

Le label MINERGIE a développé un complément au standard MINERGIE® ou MINERGIE-P® : **MINERGIE-ECO®.**

En plus d'être conforme à MINERGIE® ou à MINERGIE-P®, un bâtiment MINERGIE-ECO® répond aussi aux exigences d'une construction saine et écologique avec les critères suivants liés à l'énergie grise :

- matières premières largement disponibles et part élevée des matériaux de recyclage ;
- matériaux de construction avec de faibles nuisances pour l'environnement lors de la fabrication et de la mise en œuvre ;
- constructions aisément démontables avec des matériaux de construction qui peuvent être valorisés ou éliminés sans nuisances pour l'environnement.

En Allemagne, la **certification DGNB**, intègre dans la qualité écologique du bâtiment, deux critères sur la consommation d'énergie primaire du bâtiment (renouvelable et non renouvelable) sur l'ensemble de son cycle de vie).

En France, l'association Effinergie a créé en janvier 2012 le **label Effinergie +** adossé à la RT 2012 qui indique, dans les compléments, qu' « il est recommandé de faire une évaluation de la consommation d'énergie grise... du bâtiment.»

Les certifications tertiaires **NF bâtiment tertiaire - Démarche HQE® en France, BREEAM® en Angleterre et LEED® aux USA** intègrent des exigences plus ou moins poussées prenant en compte la question de l'énergie grise : fournir des données environnementales sur les produits de construction, distance de provenance des matériaux, quantité de matériaux biosourcés...

Le 19 avril 2012 est paru un **décret relatif au label « bâtiment biosourcé »** (Décret no 2012-518 du 19 avril 2012) qui prévoit d'intégrer dans le Code de la construction et de l'habitation un label pour les bâtiments neufs intégrant un taux minimal de matériaux biosourcés car ces matériaux présentent deux atouts : « d'une part, la matière dont ils sont issus est renouvelable, d'autre part, ils peuvent contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et au stockage temporaire de carbone. » Le décret indique aussi que « La création d'un label " bâtiment biosourcé " permet de mettre en lumière cette qualité environnementale et de valoriser les démarches volontaires des maîtres d'ouvrage intégrant une part significative de ces matériaux dans leur construction. »

Le sujet de l'énergie grise rentre peu à peu dans la culture, même s'il est aujourd'hui surtout porté par des pionniers. Toutefois, son arrivée dans les labels préfigure une intégration future dans la réglementation au même titre que les exigences sur les consommations d'énergie en exploitation et selon un processus similaire (label BBC qui devient la base de la RT 2012).

9.3 – Réfléchir sur l'énergie grise permet de changer le regard et d'optimiser les projets

La démarche d'optimisation de l'énergie grise est un outil complémentaire d'aide à la décision qui contribue à faire évoluer nos métiers. Elle dépasse largement les simples calculs pour poser des questions de société, d'usage, de durée de vie, de qualité de l'architecture, de confort, de patrimoine, de culture, de territoire, de savoir-faire, d'esthétique… Comme la démarche de réduction des consommations d'énergie en exploitation et plus largement des impacts environnementaux du bâtiment, **la prise en compte de l'énergie grise change notre regard sur les projets et nous conduit à nous reposer des questions fondamentales :**

- quels sont et quels seront les usages ? Peut-on partager des espaces ? Comment le bâtiment peut-il s'adapter aux évolutions futures ?
- faut-il démolir et reconstruire ou réhabiliter l'existant ?
- faut-il construire en dur ou peut-on créer des structures légères pour certains types d'usages ?
- quelle est l'esthétique d'une architecture de l'énergie grise minimalisée : pauvre ? surprenante ? inscrite dans le territoire ? « Sublimation » de déchets ?
- minimiser l'énergie grise suppose pour le concepteur, comme dans toute démarche écoresponsable, d'impliquer l'ensemble des acteurs : le maître d'ouvrage et les usagers pour réfléchir aux usages, aux partages des espaces, à l'acceptabilité esthétique des choix de principes constructifs et matériaux mais aussi l'exploitant pour les choix des principes de maintenance et enfin les entreprises et leurs compagnons pour faire du chantier un moment d'optimisation de la conception et de partage des savoir-faire ;
- diminuer l'énergie grise peut-il et doit-il conduire à un renouveau de l'architecture vernaculaire ? à un développement des filières locales en termes de ressources et de savoir-faire ?
- quelle échelle de réflexion utiliser : locale, globale ? Comment éviter de reporter des impacts en dehors du périmètre de l'opération ?
- jusqu'où peut-on espérer aller dans la réduction de l'énergie grise. Peut-on imaginer un concept de type « zéro énergie grise » et dans ce cas avec quoi compenser ?

HOTEL LES CHALETS DE L'AIGUILLE GRIVE - Architecte : Atelier COS - AMO HQE : Le Sommer Environnement Photo : Le Sommer Environnement

10. Annexes

Annexe 1 – Facteur de conversion énergie primaire / énergie finale

Première approche : bilan annuel des flux

C'est l'approche adoptée par Global Chance et par le collectif négaWatt[41]. Elle consiste à comptabiliser l'énergie primaire consommée annuellement par source d'une part et l'énergie finale consommée annuellement par usage d'autre part.

Pour calculer le contenu en énergie primaire de l'électricité produite en France, appelé facteur d'énergie primaire ou PEF (*Primary Energy Factor*), Global Chance s'appuie sur les statistiques de production d'électricité d'Enerdata. Le principe du calcul et les résultats sont repris dans la figure 63.

Par convention, on considère que le rendement de production de l'électricité à partir de ressources renouvelables (hydraulique, éolien, solaire) est 1. Le rendement de 85 % pour l'hydraulique vient du rendement du pompage utilisé pour contribuer à effacer les pointes de consommation.

La part de l'hydraulique varie notablement d'une année sur l'autre en fonction du climat. La tendance sur la dernière décennie est à une diminution, du fait de la baisse des précipitations.

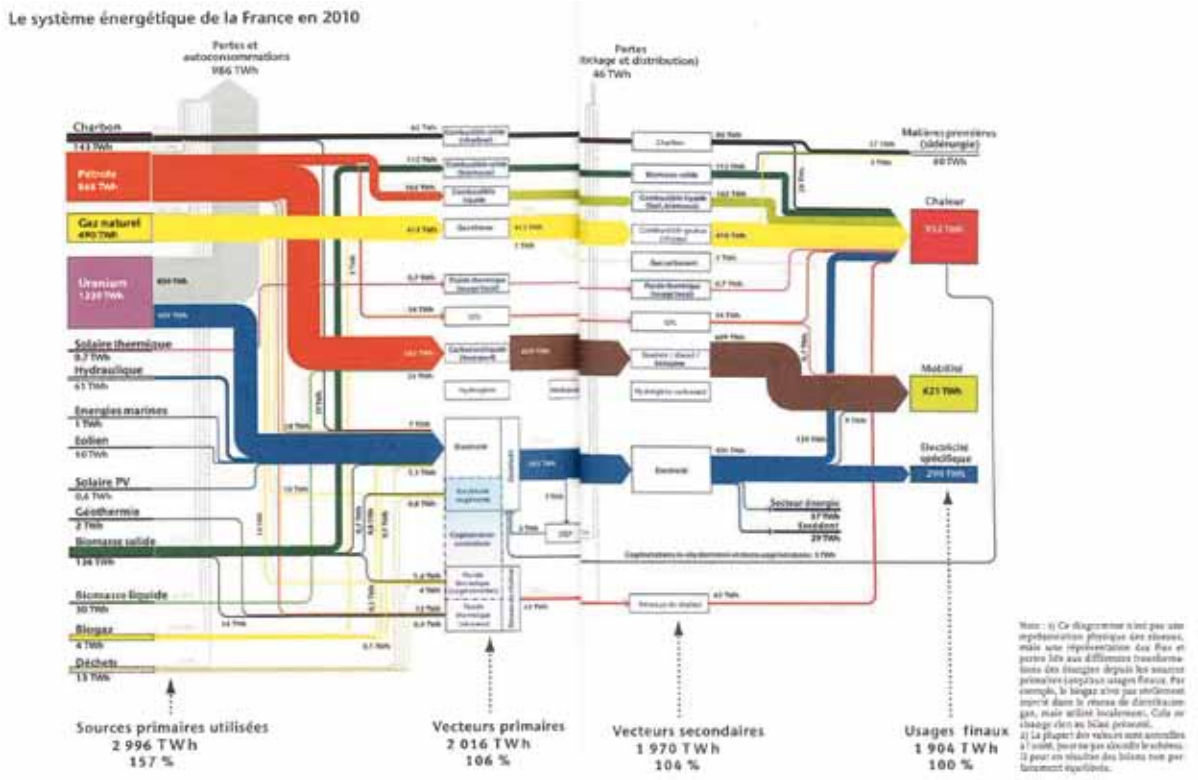


Figure 62 - Le système énergétique de la France en 20120 - Source : négaWatt

41 - Cahiers de Global Chance n°27, janvier 2010 (http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GC27tableau19.pdf)

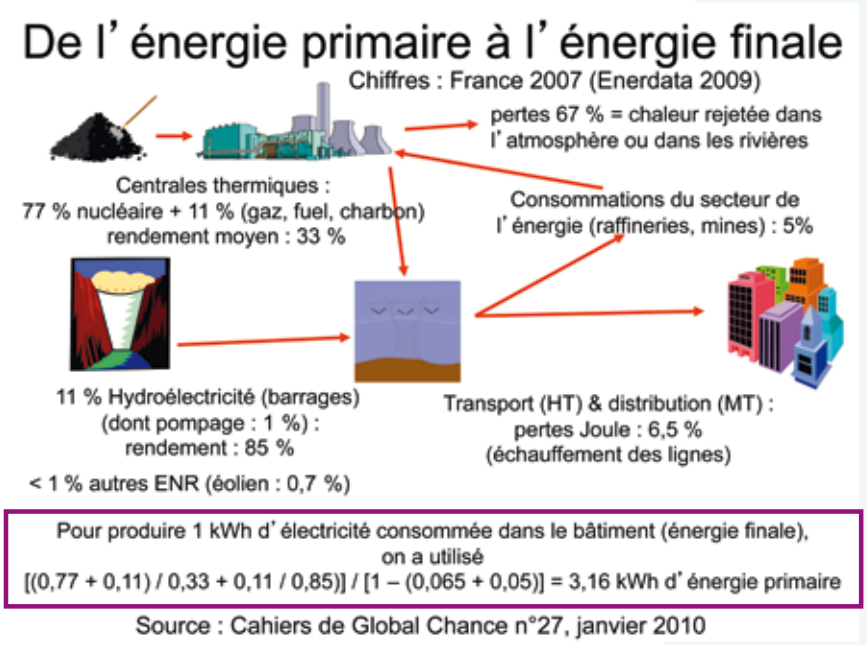


Figure 63 - Calcul du Facteur d'Energie Primaire (PEF) du mix électrique français (Sidoroff, 2012)

Deuxième approche : analyse du cycle de vie

C'est l'approche adoptée par le Centre d'Energétique de l'École des Mines de Paris (CENERG).

Elle considère non seulement les consommations annuelles, mais aussi l'énergie nécessaire à la construction des centrales électriques, des navires transportant les combustibles (uranium, pétrole et gaz), ou des éoliennes, bref à l'ensemble des étapes amont du cycle de vie des vecteurs énergétiques avant leur usage final. Elle s'appuie sur la base de données Ecoinvent version 2007, et pour le photovoltaïque sur les données de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie). Pour le bois, elle comptabilise la coupe des arbres, leur transport, la transformation en combustible adapté à une chaudière.

Pour compléter ce graphique avec l'énergie éolienne, on peut utiliser les données d'Ecoinvent, soit 1,13 kWh primaire / kWh final pour les grandes éoliennes (2 MW) et 1,30 pour les petites (30 kW).

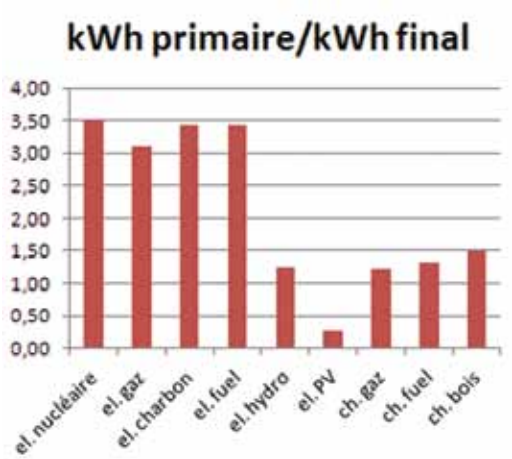


Figure 64 - Équivalences en énergie primaire par kWh final pour différentes énergies – Source : Bruno Peuportier, Centre Energétique et Procédés, MINES ParisTech

À partir de ces valeurs et du profil de production d'électricité de l'année 2007, on peut calculer le coefficient de conversion EP/EF (PEF) du mix électrique français pour cette même année :

PRODUCTION BRUTE	TWh/an	PEF
Hydraulique	63,7	1,25
Nucléaire	439,7	3,5
électricité-charbon	28,2	3,4
électricité-pétrole	6,2	3,4
électricité-gaz	22,0	3,2
électricité-biomasse	5,5	
Éolien	4,1	
Total 2007	569,4	3,23

Calcul du PEF du mix électrique français (Sidoroff, données CENERG et ENERPLAN)

Troisième approche : la réglementation française

Par convention, le coefficient de conversion EP/EF (PEF) de la réglementation thermique française des bâtiments (RT2012)[42] est pris égal à 2,58 pour l'électricité.

Pour l'AIE, l'électricité d'origine nucléaire est appelée « électricité primaire »[43], ce qui permet de faire abstraction des pertes thermiques des centrales nucléaires (64 %) et des consommations d'énergie amont (extraction et transport du minerai, enrichissement de l'uranium, fabrication et transport du combustible) et aval (démantèlement des centrales, retraitement et stockage des déchets radioactifs).

Cette convention est reprise dans les statistiques officielles françaises, ce qui permet de diminuer le PEF du mix électrique et de gonfler le taux d'indépendance énergétique de la France, puisque cette électricité est considérée comme « nationale » alors qu'elle est produite à partir d'uranium importé[44].

Quatrième approche : le label Energy Star

Ce label créé et géré par l'US EPA (Environmental Protection Agency) et l'US DOE (Dept of Energy) comporte un volet d'évaluation de la performance énergétique des bâtiments. Afin de permettre des comparaisons équitables sur l'ensemble du territoire des USA, des ratios de conversion moyens ont été établis et décrits dans un guide[45] dont les résultats sont repris dans les tableaux ci-après :

42 - Art. 15 de l'arrêté du 27 oct. 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments

43 - « Primary heat arises from geothermal reservoirs, nuclear reactors and solar panels converting incoming solar radiation to heat. The form for nuclear energy is not the heating value of the nuclear fuel used as this is difficult to establish unambiguously. Instead, the heat content of the steam leaving the reactor for the turbine is used as the primary energy form … In general, the statistical production point is chosen to be a suitable measurement point as far " downstream " as possible from the capture of the energy flow before the energy flow is used. For example, for hydroelectricity, this will be the electricity generated at the alternators driven by the water turbines. For nuclear reactors, it will be the heat content of the steam leaving the reactor », in http://www.iea.org/stats/docs/statistics_manual.pdf page 22. Pourtant, on lit page 39 : « Primary electricity is obtained from natural sources such as hydro, wind, solar, tide and wave power. Secondary electricity is produced from the heat of nuclear fission of nuclear fuels, from the geothermal heat and solar thermal heat, and by burning primary combustible fuels … Primary heat is obtained from natural sources such as geothermal and solar thermal power. Secondary heat is obtained from the nuclear fission of nuclear fuels, and by burning primary combustible fuels »

44 - L'uranium vient principalement du Niger, du Canada et du Kazakhstan. Pour une discussion des conséquences de cette convention sur les statistiques nationales, voir le Manifeste négaWatt, 2012, Coédition Actes Sud/Colibris - Collection : Domaine du possible, p. 47 et suiv.

45 - ENERGY STAR Performance Ratings Methodology for Incorporating Source Energy Use, http://www.energystar.gov/ia/business/evaluate_performance/site_source.pdf?2120-374c

Table 1 Source-Site Ratios for all Portfolio Manager Fuels	
Fuel Type	**Source-Site Ratio**
Electricity (Grid Purchase)	3.34
Electricity (on-Site Solar or Wind Installation)	1.0
Natural Gas	1.047
Fuel Oil (1,2,4,5,6,Diesel, Kerosene)	1.01
Propane & Liquid Propane	1.01
Steam	1.21
Hot Water	1.28
Chilled Water	1.05
Wood	1.0
Coal/Coke	1.0
Other	1.0

Figure 65 - PEF du mix électrique moyen des USA (source : guide méthodologique Energy Star)

Table 4 Source-Site Ratio Calculations for Electricity				
Year	**Primary Energy Consumed for Generation**	**Net Generation**	**T&D Losses**	**Source-Site Ratio**
2001	38.56	12.69	1.20	3.356
2002	39.56	13.10	1.24	3.336
2003	39.62	13.13	1.24	3.332
2004	40.77	13.49	1.28	3.339
2005	41.60	13.78	1.31	3.336
Average (2001-2005)				**3.340**
Source: *Electricity Flow (Figure 8.0) in the Annual Energy Review. Values in Quadrillion Btus (Quads). http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/contents.html*				

Figure 66 - PEF des sources d'énergie locales aux USA (source : guide méthodologique Energy Star)

Cinquième approche : la norme NF EN 15603 (octobre 2008)[46]

Cette norme donne les définitions suivantes :

- facteur d'énergie primaire totale (PEF total) : « Pour un vecteur énergétique donné, l'énergie primaire renouvelable et non renouvelable divisée par l'énergie reçue de l'extérieur, l'énergie primaire étant celle nécessaire pour fournir une unité d'énergie reçue de l'extérieur, compte tenu de l'énergie nécessaire à l'extraction, au traitement, au stockage, au transport, à la génération, à la transformation, à la transmission, à la distribution et à toute autre opération nécessaire pour acheminer l'énergie reçue de l'extérieur jusqu'au bâtiment qui va l'utiliser » ;
- facteur d'énergie primaire non renouvelable (PEF nr) : « Pour un vecteur énergétique donné, énergie primaire non renouvelable divisée par l'énergie reçue de l'extérieur, l'énergie non renouvelable étant celle nécessaire pour fournir une unité d'énergie reçue de l'extérieur, compte tenu de l'énergie non renouvelable nécessaire à l'extraction, au traitement, au stockage, au transport, à la génération, à la transformation, à la transmission, à la distribution et à toute autre opération nécessaire pour acheminer l'énergie reçue de l'extérieur jusqu'au bâtiment qui va l'utiliser ».

L'annexe E de cette norme fournit le tableau de la figure 67 :

Un travail intéressant a été effectué par ECOFYS en septembre 2011[47]. Il met en évidence les disparités de PEF selon les pays, ainsi que les écarts entre les valeurs officielles et celles que l'on obtiendrait en appliquant les définitions de la norme NF EN 15603, sans toutefois prendre en compte les étapes amont et aval de la production d'électricité nucléaire, dont le rendement est pris égal à 36 % (hypothèse de l'AIE)[48]. Ces valeurs sont données dans le tableau de la figure 68 :

Annexe E (informative) Facteurs et coefficients

	Facteurs d'énergie primaire f_P		Coefficient de production de CO_2 K
	Non renouvelable	Totale	kg/MWh
Fioul	1,35	1,35	330
Gaz	1,36	1,36	277
Anthracite	1,19	1,19	394
Lignite	1,40	1,40	433
Coke	1,53	1,53	467
Copeaux de bois	0,06	1,06	4
Bûche	0,09	1,09	14
Bûche de hêtre	0,07	1,07	13
Bûche de sapin	0,10	1,10	20
Électricité d'une centrale hydraulique	0,50	1,50	7
Électricité d'une centrale nucléaire	2,80	2,80	16
Électricité d'une centrale électrique au charbon	4,05	4,05	1340
« Mix » électrique UCPTE	3,14	3,31	617

Tableau E.1 Facteurs d'énergie primaire et coefficients de production de CO_2

Source : Oekoinventare für Energiesysteme — ETH Zürich (1996).
Ces facteurs incluent l'énergie utilisée pour construire les systèmes de transformation et de transport en vue de la transformation de l'énergie primaire en énergie reçue de l'extérieur.

Figure 67 - Norme NF EN 15603 Annexe E (Source : Ökoinventare für Energiesysteme - ETH Zürich 1996)

46 - NF EN 15603 : Performance énergétique des bâtiments - Consommation globale d'énergie et définition des évaluations énergétiques, oct. 2008.
47 - E. Molenbroek, E. Stricker, Th. Boermans, Primary energy factors for electricity in buildings, 22/09/11, http://www.slideshare.net/sustenergy/webinar-primary-energy-factors-for-electricity-in-buildings
48 - Dans la 1re et la 2me approche ci-dessus, on intègre les étapes amont et aval de la production nucléaire dans certaines limites (démantèlement des centrales et stockage définitif des déchets sont exclus)

2. National Primary Energy Factors (PEFs)

	France	Germany	NL	Poland	Spain	Sweden	UK
%RE	12.8%	10.3%	4.2%	2.7%	22.3%	50.2%	4.7%
PEF	2.58	2.6	2.56	3	2.6	2	2.92
PEF (RE=0)	2.63	2.54	2.30	3.23	1.78	1.60	2.43
PEF (RE=1)	2.77	2.65	2.35	3.26	2.01	2.14	2.48

Nuclear: 2.8, av. $\eta_{thermal}$, no upstream and downstream losses

1re ligne : part d'énergie renouvelable – 2e ligne : PEF national officiel - 3e ligne : PEF non renouvelable – 4e ligne : PEF total

Figure 68 - Les PEF selon les pays – ECOFYS, septembre 2011

On constate que, sous réserve de valider les hypothèses restrictives de non-prise en compte des consommations d'énergie amont et aval du nucléaire, seules l'Allemagne et la Suède ont une valeur de PEF cohérente avec les données physiques, tandis que la France et la Pologne ont un PEF sous-évalué alors que les Pays-Bas, l'Espagne et le Royaume-Uni ont un PEF surévalué.

Par ailleurs, l'Irlande a un PEF identique à celui de la France (2,58), mais issu d'un calcul rigoureux et actualisé périodiquement[49].

ECOFYS plaide en faveur d'un PEF cohérent avec les données physiques et actualisé en fonction de la part croissante prise par les énergies renouvelables dans les mix électriques nationaux.

Quelques valeurs conventionnelles du PEF de l'électricité en dehors de la France

> 2 en Suisse pour Minergie ;

> 2,85 en Allemagne pour Passivhaus ;

> 3,31 en Californie pour LEED.

Contenu énergétique du chauffage bois

Les valeurs suivantes de coefficient énergie primaire/énergie utile (y compris pertes de distribution) sont issues des données des éco-bilans de KBOB et d'une étude de l'ADEME : « Bilan environnemental du chauffage domestique au bois - Note de synthèse – Bio Intelligence service - Décembre 2005. »

49 - Derivation of Primary Energy and CO_2 Factors for Electricity in DEAP Q4 2011, Sustainable Energy Authority of Ireland, 2011, http://www.seai.ie/Your_Building/BER/BER_FAQ/FAQ_DEAP/Results/DEAP_elec_factors_FAQ_Q42011.pdf

	Énergie primaire globale	Énergie primaire non renouvelable	
Source des données	KBOB	KBOB	ADEME
Chaudière à buches de bois	1,69	0,09	0,07
Chaudière à particules de bois	1,56	0,09	0,05
Chaudière à granules (pellets)	1,57	0,277	0,18

Exemple des piles

Selon l'étude Life cycle impacts of alkaline batteries with a focus on end-of-life - A study conducted for the national electrical manufacturers association de février 2011, la fabrication d'un kg de pile (moyennes de différents types AA, AAA, etc.) nécessite 66 MJ donc 18,3 kWh.

Une pile AA (1,5 V) pèse 24 g, donc cela fait 440 Wh par pile. La durée d'utilisation est de 300 h pour une intensité de 10 mA donc l'énergie fournie est de 4,5 Wh. Il faut donc 100 fois plus d'énergie pour fabriquer la pile que ce qu'elle fournit.

Annexe 2 – Tableau synthétique des résultats des calculs d'énergie grise effectués par les membres du groupe de travail

PROJET	TYPE	PRINCIPES CONSTRUCTIFS	SURFACE SHON (m^2)	DURÉE DE VIE (ans)	CONSOMMATION D'ÉNERGIE EN EXPLOITATION (kWhep/m^2SHON)	ÉNERGIE GRISE TOTALE				« ÉNERGIE GRISE PAR LOTS (kWh/m^2SHON) »				ÉQUIVALENCE DE L'ÉNERGIE GRISE EN ANNÉES DE CONSOMMATION D'UN BÂTIMENT BBC
	N = construction neuve, R = Réhabilitation	Description synthétique				Outil de calcul / base de données	Nature de l'énergie grise	Valeur par unité de surface sur la durée de vie (kWh/m^2_{SHON})	Valeur par unité de surface et par année (kWh/m^2SHON.an)	Structure	Enveloppe	Équipements	Aménagement intérieur	50 kWh/m^2_{SHON}.an
MÉANDRE														
École zéro énergie Pantin 12 classes, Centre loisirs, restaurant scolaire	N	Gros œuvre rdc et refend en béton, charpentes, murs et planchers en structure bois, menuiserie alu/bois	3 570	80	-3	Econsten/ Ecoinvent	Énergie primaire totale (matière et procédé)	**3 458**	**43**	/	/	Panneaux photovoltaïques uniquement	/	**69**
École zéro énergie Pantin - Variante RT 2005		idem sans capt. sol.PV, isol therm, réglem., double vitrage au lieu de triple			321			**3 001**	**38**	/	/		/	**60**

TRIBU														
Crèche structure bois (44 berceaux + 12 logements)	N	Le projet se développe sur une dalle de parking existant, il n'y a donc pas d'infrasctructure. La structure est en bois.	791	50	Plan Climat Paris Cep < 50 kWhep/ m²shon.an	Outil TRIBU / KBOB	Énergie procédé non renouvelable	**1 511**	**30**	299	859	182	171	**30**
Crèche variante béton	N	Le projet se développe sur une dalle de parking existant, il n'y a donc pas d'infrasctructure. La structure est en béton.						**1 764**	**35**	552	859	182	171	**35**
Musée œunologique	N	Le projet se compose de plusieurs bâtiments de faible hauteur, en construction mixte béton/bois/ terre crue	1 369	50	Conso < 85 kWh/m².an tous usages	Outil TRIBU / KBOB	Énergie procédé non renouvelable	**1 098**	**22**	331	615	151	0	**22**
Immeuble de bureaux 16 000 m²	N	Le projet est un bâtiment R+7 en construction béton armé, avec 3 niveaux de parking en sous-sol	15 704	50	Cep < 55 kWh/m².an Label BBC	Outil TRIBU / KBOB	Énergie procédé non renouvelable	**1 816**	**36**	512	394	177	732	**36**
Immeuble de bureaux 5 000 m²	N	Le projet est un bâtiment R+5 en construction béton armé, avec 2 niveaux de parking en sous-sol	5 060	50	Zero énergie Cep = 0 Labellisé BBC et certifié HQE	Outil TRIBU / KBOB	Énergie procédé non renouvelable	**1 676**	**34**	835	311	243	287	**34**
Musée	R + N	Le projet consiste en une rénovation de bâtiment existant, + une extension neuve très vitrée (espaces muséographiques)	9 345	50	Aucun label énergétique	Outil TRIBU / KBOB	Énergie procédé non renouvelable	**1 421**	**28**	261	243	484	434	**28**
Immeuble de bureaux à énergie positive 24 000 m²	N	Le projet est un bâtiment R+6 en construction béton armé, avec 2 niveaux de parking en sous-sol	23 365	50	Energie positive 49,3 kWh ef/m².an tous usages confondus (hors process RIE et bureautique)	Outil CECOBA développé apr ARCOBA / Ecobilans	Énergie primaire totale	**1 453**	**29**	864	311	102	175	**29**

PROJET	TYPE	PRINCIPES CONSTRUCTIFS	SHON (m²)	Durée de vie (ans)	Consommation d'énergie en exploitation (kWhep/m²SHON)	ÉNERGIE GRISE TOTALE				« ÉNERGIE GRISE PAR LOTS (kWh/m²SHON) »				ÉQUIVALENCE DE L'ÉNERGIE GRISE EN ANNÉES DE CONSOMMATION D'UN BÂTIMENT BBC
	N = construction neuve, R = Réhabilitation	Description synthétique				Outil de calcul / base de données	Nature de l'énergie grise	« Valeur par unité de surface sur la durée de vie (kWh/m²SHON) »	Valeur par unité de surface et par année (kWh/m²SHON.an)	Structure	Enveloppe	Équipements	Aménagement intérieur	«50 kWh/m²SHON.an»
LE SOMMER ENVIRONNEMENT														
Collège AUB	N	Projet comprenant le collège, le réfectoire, le gymnase et les logements de fonction.	8 392	80	Niveau visé BBC. 61,7	ELODIE / INIES	Énergie primaire totale	**1 680**	**21**	522	749	/	408	**34**
Collège AUL	N	Projet comprenant le collège, le réfectoire, le gymnase et les logements de fonction.	6 370	80	Niveau visé BBC. 61	ELODIE / INIES	Énergie primaire totale	**2 580**	**32**	876	1228	/	472	**52**
Collège CLI	N	Projet comprenant le collège, le réfectoire, le gymnase, la piscine et les logements de fonction.	9 228	80	Niveau visé « zéro énergie » 63,62	ELODIE / INIES	Énergie primaire totale	**1 890**	**24**	592	885	/	415	**38**
Collège RAI	N	Projet comprenant le collège, le réfectoire, le gymnase et les logements de fonction.	6 779	80	Niveau visé BBC. 61	ELODIE / INIES	Énergie primaire totale	**1 870**	**23**	811	601	/	455	**37**
Collège BLA	N	Projet comprenant le collège, le réfectoire, le gymnase et les logements de fonction.	9 169	80	Niveau visé BBC. 45,5	ELODIE / INIES	Énergie primaire totale	**2 600**	**33**	767	1158	/	672	**52**

Collège BON	N	Projet comprenant le collège, le réfectoire, le gymnase et les logements de fonction.	8 807	80	Niveau visé BBC. 45	ELODIE / INIES	Énergie primaire totale	**1 630**	**20**	577	599	/	448	**33**
Collège NOI	N	Projet comprenant le collège, le réfectoire, le gymnase, l'internat et les logements de fonction.	10 261	80	Collège « zéro énergie » 49,87	ELODIE / INIES	Énergie primaire totale	**1 890**	**24**	618	720	/	549	**38**
Collège SAI	N	Projet comprenant le collège, le réfectoire, le gymnase et les logements de fonction.	6 480	80	Niveau visé BBC. 48,9	ELODIE / INIES	Énergie primaire totale	**2 090**	**26**	728	973	/	389	**42**
SYMOE														
Immeuble de bureau à Paris	R + N	2 niveaux de sous-sols, 2 niveaux de superstructure à usage de commerce (reconversion du bâtiment existant), 5 niveaux en surélévation. Structure béton	26 000	30	72	Facteur d'émissions : Bilan carbone V6 ADEME Bilan Produit ADEME®	Convertion peu représentative entre les GES et l'énergie grise -> Valeurs dans les colonnes suivantes en kg éq. CO_2	***390 kg éq. CO_2/m^2_{SHON}***	***13 kg éq. CO_2***	*308,6 kg éq. CO_2*	*61,8 kg éq. CO_2*	*18,6 kg éq. CO_2*	*0,6 kg éq. CO_2*	-
Immeuble bureaux/ logements/commerces à Lille	N	Infrastructure et superstructure en béton armé	7 400	30	84			***1491 kg éq. CO_2/m^2_{SHON}***	***50 kg éq. CO_2***	*1056,4 kg éq. CO_2*	*96,4 kg éq. CO_2*	*248,5 kg éq. CO_2*	*89,6 kg éq. CO_2*	-
LES ENR														
Aire de service - Base	N	Complexe RTh - parpaing avec isolant intégré, Agglomérés plein, Armstrong Sierra, faux plafond minéral, isolant Polystyrène extrudé 100, Isolant Rockacier 140)	1 020	30	BBC RT 2005	ELODIE / INIES	Énergie primaire totale	**412**	**14**	162	200	/	50	**8**
Aire de service - Variante	N	Brique monomur	1 020	30	BBC RT 2005	ELODIE / INIES	Énergie primaire totale	**558**	**19**	308	200	/	50	**11**

Annexe 3 – Autres bases de données de la construction

ESUCO - PE International

Nom de la base de données : ESUCO

Nom de l'éditeur : PE International.

http://www.pe-international.com/france/index/

Données sources : GaBi Software.

http://www.gabi-software.com/databases/

Données extraites : pas de données directement exploitables, mais introduites dans l'outil interne DGNB®[50] .

La banque de données ESUCO a été développée par PE International pour la DGNB, en reprenant la banque de données Ökobau.dat (également développée par PE International). ESUCO sert de base pour le calcul des impacts environnementaux d'un projet visant la certification internationale DGNB®.

Cette banque de données comporte pour chaque pays européen des valeurs énergétiques adaptées relatives à la phase d'utilisation. Les valeurs relatives à la fabrication des produits de construction visent une situation européenne typique, c'est-à-dire qu'il sera possible de calculer les impacts environnementaux à partir de valeurs moyennes européennes comme données de base. Les EPD spécifiques aux pays établies dans le système IBU (Institut Bauen und Umwelt[51]) sont de plus incluses, (cela signifie par exemple, qu'une EPD pour un ouvrage en Autriche, est incluse en tant qu'enregistrement autrichien, en plus du « mix européen »).

Les valeurs sources sont en grande partie des valeurs fournies par les industriels ou les groupements d'industriels. Elles peuvent être en partie remodelées et complétées, seulement lorsque cela est nécessaire, avec des valeurs issues de la littérature. La base pour toutes les valeurs de fond est la base de données GaBi de PE International.

En 2012, les bases de données (Ökobau.dat et plus tard ESUCO) sont en cours d'adaptation aux exigences de la nouvelle norme européenne EN15804 pour les EPD. PE International prévoit d'offrir la banque de donnée ESUCO comme banque supplémentaire au logiciel GaBi.

ESUCO sera disponible également en tant que banque de donnée d'ICV.

IBO

Nom de la base de données : IBO building materials database

Nom de l'éditeur : IBO (Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie[52]).

http://www.ibo.at/en/index.htm

Données sources : Ecoinvent + données IBO

Données extraites : directement utilisées dans l'outil Ecosoft.
http://www.ibo.at/en/ecosoft.htm

IBO est une base de données autrichienne qui compile des informations d'Ecoinvent 2.0 et celles de l'Institut autrichien pour l'écologie et la biologie du bâti (IBO).

Elle donne accès à environ 500 matériaux avec notamment un indicateur sur l'énergie primaire non renouvelable. L'énergie procédé d'origine renouvelable n'est pas accessible. L'analyse fait l'hypothèse d'une durée de vie de 100 ans.

Les données sont vérifiées par l'IBO. Gratuite, elle est uniquement disponible en allemand.

50 - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
51 - Institut pour la construction et l'environnement
52 - Institut autrichien pour la construction et l'écologie

ELCD – Commission européenne

Nom de la base de données : ELCD. http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm#

Nom de l'éditeur : Commission européenne - DG Centre commun de recherche - Institut pour l'environnement et le développement durable. http://ies.jrc.ec.europa.eu/index.php

Données sources : Inventaires de cycle de vie provenant d'associations d'industriels et d'autres sources jugées pertinentes.

Données extraites : Extraites dans l'outil ILCD

ELCD est une base de données publiant les résultats d'analyses de cycle de vie émanant de la plateforme LCA, sous la tutelle de la commission européenne.

Cette plate-forme européenne sur les ACV se donne pour objectif d'assister les entreprises et les pouvoirs publics dans la mise en œuvre d'une production et d'une consommation dite durable. Une assistance technique au sein de la plate-forme diffuse des conseils, des méthodes et des hypothèses cohérentes et de qualité sur les données de cycle de vie des produits proposés. La plate-forme LCA accueille également un panel d'outils, de données de référence et de méthodes de calculs recommandées concernant l'établissement d'ACV.

Green Guide to Specification du BRE

Nom de la base de données : Green Guide to Specification

Nom de l'éditeur : BRE (Building Research Establishment).
http://www.bre.co.uk/page.jsp?id=499

Données sources : ACV du BRE

Données extraites : ACV directement extraites de la base de données

C'est une base de données du BRE qui fait partie de la certification anglaise des bâtiments, BREEAM (BRE Environmental Assessment Method). Elle rassemble des produits du bâtiment (environ 1500) dont les impacts environnementaux ont été évalués et notés pour 6 typologies de bâtiments.

L'évaluation environnementale est basée sur une analyse de cycle de vie qui utilise la méthodologie « BRE's Environmental Profiles Methodology » de 2008 et se base sur les normes suivantes : ISO 14040:2006, ISO 14044:2006, ISO 14025:2006 Type 3, et ISO 21930:2007.

Le profil environnemental comporte le calcul de 13 impacts. 3 impacts concernent l'utilisation de l'énergie :

- changement climatique : kg équivalent CO_2 (durée analyse : 100 ans) ;
- consommation d'énergies fossiles : tonnes d'équivalent pétrole (tep) et MJ ;
- déchets nucléaires : mm^3 de déchets dangereux produits.

La consommation d'énergies fossiles ne distingue pas l'énergie procédé et l'énergie matière. Il n'y a pas non plus de données complémentaires sur les consommations d'énergie nucléaire (hormis la production de déchets) et d'énergie renouvelable. Il n'est donc pas possible d'extraire la valeur de l'énergie grise selon la définition de l'ICEB.

Les données sont calculées pour une unité fonctionnelle d'1 m^2 sur une durée de vie de 60 ans.

La base de données est consultable gratuitement en ligne ou achetable dans sa version papier.

Approved Environmental Profile

Characterised and Normalised Data for:

1 square metre over 60 Year Study Period: Floor Finishes: Soft floor coverings: InterfaceFlor Carewear Tufted Sheet Carpet, 3.45 kg/m2 total carpet weight, PVC backed.

Quality of Data for Profiled Material (Data for other constituent materials are available from BRE Global)

Start Date:	**01/07/2006**	Source of Data:	**Company production records**
End Date:	**30/06/2007**	Geography:	**UK**
Representativeness:	**1 site representing 100% of product**		
LCA Methodology:	**BRE Global Environmental Profiles Methodology (2008)**		
Allocation:	**100% to product**		
Date of Data Entry:	**10/03/2009**		
Boundary:	**Cradle to Grave over 60 Year Study Period**		
Applicable Buildings:	**Domestic, Offices, Education, Health**		

Issue	*Characterised Data*	*Unit*
Climate Change	120	kg CO2 eq. (100yr)
Water Extraction	0.84	m^3
Mineral Resource Extraction	0.017	tonnes
Stratospheric Ozone Depletion	0.00024	kg CFC11 eq.
Human Toxicity	26	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicity to Freshwater	3.1	kg 1,4-DB eq
Nuclear Waste (higher level)	0.00000016	m^3 high level waste
Ecotoxicity to Land	0.15	kg 1,4-DB eq
Waste Disposal	30	kg
Fossil Fuel Depletion	1700	MJ
Eutrophication	0.057	kg PO4 eq.
Photochemical Ozone Creation	0.12	kg ethene eq.
Acidification	0.61	kg SO2 eq.

Issue	*Normalised Data*	*Western European Citizen's Impacts*
Climate Change	0.0098	12300 kg CO2 eq. (100yr)
Water Extraction	0.0022	378 m^3
Mineral Resource Extraction	0.00068	24.4 tonnes
Stratospheric Ozone Depletion	0.0011	0.217 kg CFC11 eq.
Human Toxicity	0.0013	19700 kg 1,4-DB eq.
Ecotoxicity to Freshwater	0.0023	1320 kg 1,4-DB eq.
Nuclear Waste (higher level)	0.0067	2.37E-05 m^3 high level waste
Ecotoxicity to Land	0.0012	123 kg 1,4-DB eq.
Waste Disposal	0.008	3750 kg
Fossil Fuel Depletion	0.0062	273 GJ
Eutrophication	0.0017	32.5 kg PO4 eq.
Photochemical Ozone Creation	0.0054	21.5 kg ethene eq.
Acidification	0.0085	71.2 kg SO2 eq.

BRE Ecopoints Score	**0.44**	*Ecopoints*

Appendix No 405 f
Issue No: 1

Valid From: 22/01/2010
Last Revised: 22/01/2010

Signed On Behalf of BRE Global: B Randall

BRE Global Ltd., Garston, Watford WD25 9XX. Tel 01923 664100 Fax 01923 664603 www.breglobal.com
This certificate remains the property of BRE Global and is issued subject to terms and conditions
and is maintained and held in force through annual review and verification.
To check the validity of this certificate, please visit www.greenbooklive.com.

Figure 69 - Profil environnemental BRE d'une moquette

Catalogue OFEN

C'est un catalogue suisse de produits de construction (interface dynamique) basé sur les données de l'office fédéral suisse de l'énergie (OFEN) et sur les éco-bilans de la base KBOB.

Il se focalise sur l'étude des parois (environ 200 parois prédéfinies classées par famille : murs, toits, fenêtres).

L'outil permet essentiellement de comparer des produits ou des parois entre eux au vu notamment de leurs énergies primaires renouvelables et non renouvelables (dans la version pro). Il présente l'avantage de calculer l'énergie grise pour Minergie dans sa version EXPERT. Le calcul détaille l'impact par phases (fabrication, rénovation, élimination). Toutefois, la durée de vie est fixée à 60 ans par défaut pour la construction neuve et 30 ans pour la rénovation. De plus les parois prédéfinies ne sont pas modifiables.

Trois niveaux du catalogue OFEN sont disponibles : basic (gratuit), pro (180 francs suisses) et expert (500 francs suisses) en français ou en allemand. Si la prise en main est rapide, l'explication de la méthodologie est réduite.

BAUBOOK

C'est un catalogue autrichien de produits de construction (interface dynamique) basé sur les résultats de la base IBO.

Il se focalise également sur l'étude des parois (environ 30 parois classées par famille : murs, toits, fenêtres) avec la possibilité de modifier certains paramètres.

L'outil permet uniquement de comparer des produits ou des parois entre eux en fournissant la seule énergie primaire (pas de détail). Par ailleurs, le seul indicateur produit par l'outil est un indice de la qualité écologique de la construction, Oi3KON qui agrège le contenu en énergie primaire non renouvelable, le potentiel de réchauffement climatique et le potentiel d'acidification. La durée de vie n'est pas utilisable. Gratuit, la prise en main de BAUBOOK est rapide mais l'interface est en allemand.

Annexe 4 – Les autres outils de calcul

Les outils ci-après n'ont pas été expérimentés par les membres du groupe de travail et sont donc décrits de manière synthétique.

TEAM

Nom de l'outil : TEAM Bâtiment.
http://www.teambatiment.com/fr

Nom de l'éditeur : PricewaterhouseCoopers / Ecobilan. https://ecobilan.pwc.fr/index_fr.html

Données sources : FDES, ICV, fiches énergie, fiches transport

Données extraites : ACV du projet selon plusieurs indicateurs

Développé par écobilan, le logiciel, disponible en ligne (http://www.teambatiment.com/fr) se base sur les données issues des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire, FDES. Début 2011, le logiciel disposait de 118 FDES, de 12 ICV, 6 fiches « Énergie » et 4 fiches « Transport ».

L'accès au logiciel pour la saisie de FDES est gratuit et pour un accès complet au logiciel, la licence annuelle est d'environ 5000 € HT.

Les données d'entrées sont la liste des produits de construction disponibles, on sélectionne ceux utilisés dans le projet et on indique ensuite leur quantité.

L'évaluation et les calculs sont réalisés pour l'ensemble des flux des inventaires et le résultat de l'évaluation présente les impacts environnementaux conformément à la norme NF P 01 010.

Les résultats (inventaires et impacts environnementaux) sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques. Ils sont détaillés afin de permettre des analyses. Un téléchargement des données est possible par extraction des résultats dans un fichier Excel.

Eco-Bat

Nom de l'outil : Eco-Bat.
http://www.eco-bat.ch/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=16&Itemid=40&lang=fr

Nom de l'éditeur : HEIG-VD - Laboratoire d'énergétique solaire et de physique du bâtiment. http://www.lesbat.ch/

Données sources : Ecoinvent, KBOB

Données extraites : ACV comparative entre produits, systèmes constructifs ou bâtiments selon 4 indicateurs.

Eco-Bat est un logiciel suisse d'évaluation de la qualité environnementale basé sur les données issues de Ecoinvent et KBOB.

> traitant les trois niveaux typiques (produits, parois, bâtiment), il utilise une bibliothèque de 150 produits de construction et 100 équipements ;

> l'outil permet de comparer des compositions voire des modes constructifs entre eux à la contrainte près que les produits disponibles ne sont pas modifiables. De la même façon, si la durée de vie des bâtiments est spécifiée par l'utilisateur, la durée de vie des produits intégrée est fixe. L'outil permet d'ajouter la consommation d'énergie des utilisateurs ainsi que d'estimer l'impact du transport. L'énergie grise calculée ne distingue pas la part d'énergie renouvelable ;

> la version complète est disponible à 540 francs suisses (soit 450 €). Disponible en français, anglais et italien, l'interface est intuitive et simple : la prise en main est rapide (environ 2 heures) mais le temps d'utilisation est très variable (à partir de 4 h) ;

> attention, « rien n'est modifiable » et il n'y a pas de ratio en énergie renouvelable.

Outil Région Bourgogne / CYCLECO

Nom de l'outil : E-LICCO.
http://e-licco.cycleco.eu/index.php

Nom de l'éditeur : CYCLECO

Données sources : ECOINVENT en priorité + compléments de données mises en comptabilité

Données extraites : Trois indicateurs au minimum : énergie primaire non renouvelable / énergie primaire totale / changement climatique.

La Région Bourgogne a missionné le bureau d'études CYCLECO pour développer un outil de calcul de l'énergie grise afin d'accompagner les porteurs de projets dans la conception de bâtiment basse énergie ou la réhabilitation de bâtiments existants. Cet outil a été testé, entre autre, sur une dizaine de bâtiments en Bourgogne. Ses bases de données sont : Ecoinvent, les FDES et des données internes. Il donne accès à une bibliothèque d'environ 320 matériaux et systèmes constructifs.

L'outil permet de comparer jusqu'à trois solutions constructives pour le bâtiment étudié. La durée de vie des composants peut être spécifiée par l'utilisateur ou laissée par défaut. Des fonctionnalités permettent de calculer l'impact des différentes phases de vie du bâtiment et du transport. Les résultats d'énergie grise sont donnés en renouvelable et non renouvelable.

La licence d'utilisation est de 1230 € HT par an et la formation de 350 € HT par jour avec l'achat de la licence (1 à 2 jours de formation).

11. Bibliographie

11.1 – ICEB Café – Présentations PDF

> Patte, Emmanuelle (Méandre, architecte) et Houdant, Nicolas (Énergies Demain). Analyse du cycle de vie d'un bâtiment « zéro énergie ». Concevoir et construire un bâtiment « zéro énergie ». L'école du Centre à Pantin d'Emmanuelle Patte. ICEB Café, 28 octobre 2008. http://www.asso-iceb.org/cafe/cafe_28oct08.html

> Peuportier, Bruno. Eco-conception des bâtiments, méthode EQUER. ICEB Café, 25 novembre 2008. http://www.asso-iceb.org/cafe/imagescafe/Eco-conceptionbatiments_methode_EQUER.pdf
-> A la suite des réflexions initiées lors des précédents ICEB café, Bruno Peuportier présente EQUER et ses dernières évolutions, le tout illustré par des études de cas de bâtiments passifs et d'éco-quartiers.

> Corniller, Claire. L'énergie dans le bâtiment : les différentes approches. ICEB Café, 27 octobre 2009.http://www.asso-iceb.org/cafe/imagescafe/ICEB%20cafe%20271009_FCBA_CC.pdf

> Peuportier, Bruno. Énergie « grise ». ICEB Café, 27 octobre 2009. http://www.asso-iceb.org/cafe/imagescafe/ICEB-energie-grise.pdf

> Sidoroff, Serge (Pénicaud Architecture Environnement). Remarques sur les FDES et la norme NF P 01-010. Comment est calculée l'énergie grise ? Énergie matière ou énergie procédé ? http://www.asso-iceb.org/cafe/imagescafe/Sidoroff%20Sur%20la%20norme%20NF%20P%2001-010.pdf

> Osset, Philippe (directeur d'Ecobilan) et Toueix, Bruno (gérant d'ELO2, consultant en analyse de cycle de vie.). FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire) et bases de données ACV sur les produits de construction. ICEB Café, 29 mars 2010. http://www.asso-iceb.org/cafe/imagescafe/presentation_ELO2.pdf

> Brindel-Beth, Sophie. Architecture et recyclage des matériaux. Illustrations avec des exemples : Rural Studio, Recy house, etc. ICEB Café, 26 avril 2010. http://www.asso-iceb.org/cafe/cafe_26avril10.html

> Florio, Félix - Sidoroff, Alexandre et Serge Doyère (responsable de l'Entreprise Doyère Démolition). « Audits de déconstruction » : quelles conséquences pour les acteurs de la construction ? ICEB Café, 28 novembre 2011. http://www.asso-iceb.org/cafe/imagescafe/ICEB_28_nov.pdf

11.2 – Ouvrages (Études / Rapports / Revues)

> Empa. *Recherche sur les matériaux et technologie dans le domaine des EPF.* Rapport annuel 2003. Empa, 2004.

> Hélène Leh. *Évaluation des Impacts Environnementaux des Bâtiments au niveau Structure et Matériaux*. Rapport de stage, mai-septembre 2010.

> Ville de Lausanne, Service du logement et des gérances. *Projet métamorphose - Concept énergétique pour le quartier durable des Plaines-du-Loup*. Version 1 – édition, mars 2010.

> NOBATEK, ARMINES, CSTB, IZUBA ÉNERGIES, ENERTECH. *Développement des outils d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments par analyse du cycle de vie.* COnnaissance de l'IMpact environnemental des BAtiments. COIMBA 2011. 244 pages.

> Didier, Nadège et Troche, Jean-Pierre. *Éléments pour une meilleure " gestion des déplacements " dans les opérations d'aménagement,* Les cahiers de l'aménagement urbain. Groupe RESources pour l'ADEME, juin 2001.

> Nessi, Hélène. *Formes urbaines et consommation d'énergie dans les transports,* La densification en débat. Études Foncières, n°145. mai-juin 2010. 20 pages.

> *Life cycle impacts of alkaline batteries with a focus on end-of-life.* The national electrical manufacturers association, février 2011.

> *Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities,* International energy agency photovoltaic power systems programme. ADEME, mai 2006. 54 pages.

> *The LCA Sourcebook : an European Guide to Life Cycle Assessment, Sustainability*. SPOLD and business in the Environment, 1993.

> John, Stephen – Nebel, Barbara – Perez, Nicolas et Buchanan, Andy. *Environmental Impacts of Multi-Storey Buildings Using Different Construction Materials*. New Zealand Ministry of Agriculture and Forestry, février 2008. 204 pages.

> Jean-Marc Huyggen. *La poubelle et l'architecture – Vers le réemploi des matériaux*. Éditions l'Impensé Actes Sud. 2008.

> ADEME - Bio Intelligence service. *Bilan environnemental du chauffage domestique au bois - Note de synthèse.* décembre 2005.

> *The greenest building: Quantifying the environmental value of building reuse.* A report by Preservation Green Lab. www.preservationnation.org/issues/sustainability/green-lab/

11.3 – Articles de revue

> « Rénovation label Passivhaus d'un immeuble de 1894 ». *Ecologik Réhabilitation éco-responsable*. N° 16. août septembre 2010.

> Desjardins, X. et Llorente, M. « Quel rôle pour l'urbanisme et l'aménagement du territoire face au changement climatique ? ». *Revue de littérature scientifique sur le lien entre les formes d'organisation territoriale, les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre*. Études sur les « Budgets énergie environnement déplacements » de l'INRETS. PUCA, juin 2009.

11.4 – Articles Internet

> *Life cycle impacts of alkaline batteries with a focus on end-of-life*. The national electrical manufacturers association, février 2011. http://www.calpsc.org/assets/products/2011/batteries_MIT%20Battery%20LCA%20by%20NEMA%20Final.pdf

> *Resource and Environment Profile Analysis*. Coca-cola, 1969. http://www.lcacenter.org/Data/Sites/1/SharedFiles/History/Environmental%20Impacts%20of%20Coca-Cola%20Beverage%20Containers%20Vol%201.pdf

> *L'énergie grise des matériaux de construction - Les fiches techniques*. Agence locale de l'Énergie de l'agglomération lyonnaise, février 2005. http://www.ale-lyon.org/download/dossiers_tech/Energie%20grise.pdf

11.5 – Présentations

> Dr Jacques Chevalier, CSTB Environnement - Énergie grise et performances environnementales des bâtiments - Assises nationales de l'énergie grise, 15 avril 2011.

> CSTB Environnement - BENCHMARKING des résultats des projets HQEE / HQE Performance : Premiers résultats – juillet 2011.

> Conseil Régional de Bourgogne – ADEME - Intégration de la question de l'énergie grise dans le bâtiment en région Bourgogne - 18 mai 2010.

11.6 – Normes et réglementations françaises, européennes et internationales

> NF P01-010, *Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction,* décembre 2004.

> NF X30-300, *Norme sur le Management environnemental, Analyse du cycle de vie,* Principes et cadre. juin 2006.

> NF XP 01-020-3, *Qualité environnementale des produits et des bâtiments, définition et méthodes de calcul des indicateurs environnementaux pour l'évaluation de la qualité environnementale d'un bâtiment,* juin 2009.

> NF EN ISO 13786, *Performance thermique des composants de bâtiment, Caractéristiques thermiques dynamiques, Méthodes de calcul.* janvier 2000.

> NF EN ISO 14020, *Étiquettes et déclarations environnementales*, Principes généraux. février 2002.

> NF EN ISO 14025, *Marquages et déclarations environnementaux - Déclarations environnementales de type III - Principes et modes opératoires.* août 2010.

> NF EN ISO 14040, *Management environnemental, Analyse du cycle de vie, Principes et cadre.* octobre 2006.

> NF EN 15603, *Performance énergétique des bâtiments, Consommation globale d'énergie et définition des évaluations énergétiques,* janvier 2008.

> PR NF EN 15804, *Contribution des ouvrages de construction au développement durable, Déclarations environnementales sur les produits, Règles régissant les catégories de produits de construction,* juillet 2011.

> Projet NF EN 15978, *Méthode de calcul de dimension environnementale.* En cours.

> ISO 21930 - Bâtiments et ouvrages construits - Développement durable dans la construction - Déclaration environnementale des produits de construction de 2007.

> ISO 21931, *Développement durable dans la construction - Cadre méthodologique pour l'évaluation de la performance environnementale des ouvrages de construction* - Partie 1 : bâtiments. juin 2010.

> Décret n° 2011-610 du 31 mai 2011 relatif au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments.

> SIA CT 2032, *l'énergie grise des bâtiments*. 2009.

ARENE Île-de-France

Expert et référent de la Région francilienne pour le développent durable, l'Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies (ARENE) accompagne les collectivités locales et les acteurs régionaux dans leurs démarches. En associant expertises, réseaux et outils, elle fait le lien entre l'analyse et la mise en œuvre de solutions concrètes.

ICEB

L'Institut pour la conception écoresponsable du bâti (ICEB), est une association regroupant aujourd'hui une soixantaine de professionnels de l'architecture, du bâtiment, de l'urbanisme, de la santé et de l'environnement qui, au quotidien, déploient sur le terrain leur expertise de la construction et de l'aménagement durables et responsables, au service de l'usager et de son environnement.

LES GUIDES BIO-TECH

• Ventilation naturelle et mécanique •
• L'énergie grise des matériaux et des ouvrages •

39, boulevard Beaumarchais - 75003 PARIS
Tél. : 01 77 45 36 50 - Fax : 01 40 29 43 85
www.asso-iceb.org

94 bis, avenue de Suffren - 75015 Paris
Tél. : 01 82 52 88 00 - Fax : 01 40 65 90 41
www.www.areneidf.org