

LVS³

**Valorisation de la contribution des
structures en acier au
développement durable**

DOCUMENT DE RÉFÉRENCE

Février 2014

Publication d'un projet subsidié
par le Fonds de Recherche du Charbon et de l'Acier de la
Communauté européenne



Document de référence

Bien que toutes les précautions aient été prises pour garantir la sincérité et la qualité de la présente publication ainsi que des informations qu'elle contient, les partenaires du projet ainsi que l'éditeur déclinent toute responsabilité pour tout dommage matériel ou corporel éventuel pouvant découler de l'utilisation de cette publication et des informations qu'elle contient.

La reproduction à des fins non-commerciales est autorisée sous réserve que la source soit citée et que le coordinateur du projet en soit averti. Toute diffusion publique de la présente publication par d'autres sources que les sites internet mentionnés ci-dessous est soumise à l'autorisation préalable des partenaires du projet. Les demandes doivent être adressées au coordinateur du projet ARCELORMITTAL BELVAL & DIFFERANGE S.A., Rue de Luxembourg 66, Esch-sur-Alzette, Luxembourg.

Le présent document est lié au projet de dissémination (RFS2-CT-2013-00016) LVS3 - Valorisation de la contribution des structures en acier au développement durable, qui a été cofinancé par le Fonds de Recherche pour le Charbon et l'Acier

(RFCS) de la Communauté européenne.

ISBN 978-80-01-05439-0

Helena Gervásio, Paulo Santos, Luís Simões da Silva, Olivier Vassart, Anne-Laure Hettinger et Valérie Huet

Imprimé à CMM Portugal

Février 2014

TABLE DES MATIÈRES

TOC

1 INTRODUCTION

1 INTRODUCTION

Le présent document se propose d'analyser en profondeur l'élaboration et la validation des méthodologies du cycle de vie et plus particulièrement l'analyse du cycle de vie des structures en acier. Il a été élaboré dans le cadre du projet de dissémination **LVS³: Valorisation de la contribution des structures en acier au développement durable** (RFS2-CT-2013-00016).

Ce document se base sur deux méthodologies complémentaires :

- (i) La méthode des macro-composants, qui concerne l'évaluation du cycle de vie des bâtiments et/ou de leurs composants mais pas la quantification de l'énergie consommée dans le cadre de la phase d'utilisation d'un bâtiment ;
- (ii) Une approche axée sur la phase d'utilisation d'un bâtiment et qui permet de quantifier l'énergie consommée dans le cadre de la phase opérationnelle des bâtiments.

Les deux méthodes ont été développées et validées dans le cadre du projet européen RFCS *SB_Steel: Sustainability of Steel Buildings* (SB_Steel, 2014).

Les approches adoptées ont été implémentées dans les outils numériques mis à disposition pour le projet LVS3. La première a été utilisée pour le *calculateur ACV*, un outil mis au point par l'Université de Coimbra (Portugal) en collaboration avec ECCS pour les applications iPad et iPhone ; et AMECO, un outil développé par ArcelorMittal et le CTICM. Le CTICM a intégré la première approche dans le logiciel AMECO.

Le document comporte trois parties principales : La première partie (chapitre 2) introduit brièvement la pensée du « cycle de vie » et présente ensuite les diverses approches spécifiques à l'évaluation de la contribution des bâtiments au développement durable ainsi qu'une description du cadre général de l'analyse du cycle de vie, conformément aux normes internationales. La deuxième partie de ce document (chapitre 3) fournit une description détaillée des approches adoptées

pour évaluer les impacts environnementaux du cycle de vie et les besoins énergétiques d'un bâtiment au cours de sa vie opérationnelle. Enfin, la dernière partie de ce document (chapitre 4) présente une étude de cas utilisée pour valider les approches adoptées.

2 ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES BÂTIMENTS

2.1

La pensée du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) est un processus objectif visant à estimer les charges environnementales associées à un produit, à un processus ou à une activité, et à évaluer et mettre en place différents moyens permettant de garantir un plus grand respect de l'environnement.

Elle identifie et quantifie l'utilisation de matériaux, les besoins énergétiques, les déchets solides ainsi que les émissions dans l'atmosphère et dans l'eau (de l'acquisition des matières premières à la fin de vie) comme illustré à la Fig. 2.1.

La Politique intégrée des produits (COM (2003)302) recommande les approches du cycle de vie pour évaluer les impacts potentiels des produits.

Des impacts environnementaux peuvent survenir tout au long des phases du cycle de vie d'un bâtiment ou de toute autre construction. La pensée « cycle de vie » a pour principal avantage d'éviter le transfert des charges d'une phase du cycle de vie à l'autre, d'une région géographique à l'autre et d'un milieu environnemental (la qualité de l'air par exemple) à l'autre (l'eau, la terre, etc.) (PNUE, 2004).

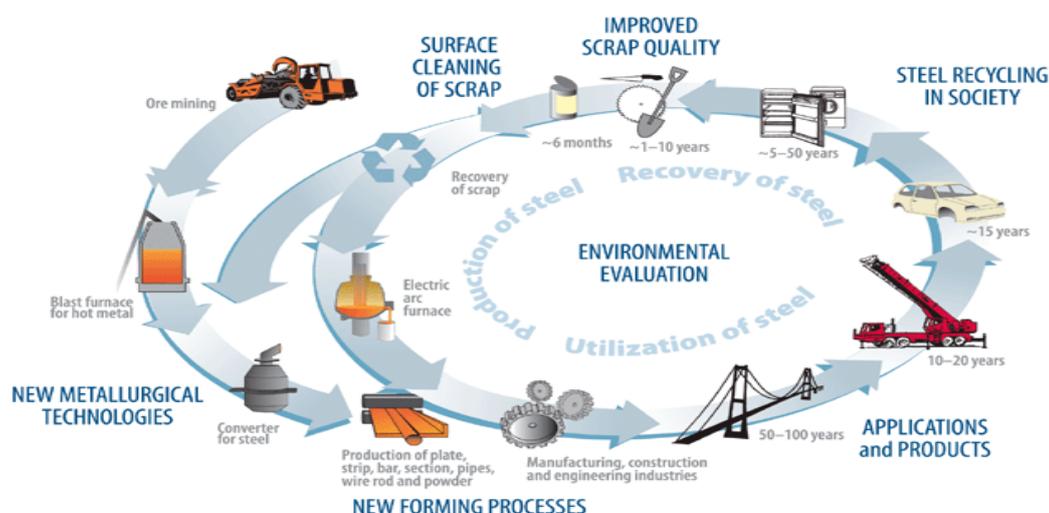


Fig. 2.1: Méthodologie du cycle de vie (source: stalkretsløppet.se)

Par ailleurs, les approches du cycle de vie permettent de faire de meilleurs choix sur le long terme. La pensée « cycle de vie » suppose que chacun, tout au long de la chaîne du cycle de vie du produit, du berceau au tombeau, assume sa responsabilité et joue son rôle en tenant compte de tous les impacts sur l'environnement (PNUE, 2004). En quantifiant toutes les émissions dans l'air, l'eau et la terre au cours de chacune des phases du cycle de vie, l'approche du cycle de vie permet d'identifier les processus les plus critiques au cours de la vie du produit ou du système, offrant ainsi un plus grand potentiel d'amélioration environnementale tout au long de l'ensemble de la chaîne du produit.

Ce type d'analyse comporte néanmoins certains désavantages :

- ✓ L'ACV est fastidieuse, onéreuse et requiert souvent une expertise pointue dans le domaine ;
- ✓ Il n'existe pas de méthodologie ACV qui obtienne un consensus général ;
- ✓ Certaines hypothèses formulées dans le cadre de l'ACV peuvent être subjectives (par exemple la détermination des frontières, la source des données et le choix de l'évaluation de l'impact) ;
- ✓ Les résultats de l'ACV peuvent être établis au niveau régional et national et donc ne pas être pertinents pour des analyses locales ;
- ✓ L'exactitude d'une étude d'ACV est fonction de la qualité et de la disponibilité de données pertinentes.

Comme l'indique le chapitre suivant, les approches du cycle de vie mises en œuvre dans ce projet cherchent à surmonter certaines des lacunes auxquelles il est fait référence dans les paragraphes précédents.

La sous-rubrique suivante du présent chapitre propose une brève synthèse des différentes méthodologies et outils d'évaluation de la contribution des bâtiments au développement durable.

2.2 Méthodologies et outils d'évaluation de la contribution des bâtiments au développement durable

Le domaine de la construction est une source d'une grande partie des impacts environnementaux générés par le secteur industriel. Ces dernières années, l'évaluation des impacts environnementaux dans le bâtiment a fait l'objet d'un intérêt croissant.

Il existe actuellement deux catégories principales d'outil d'évaluation pour l'environnement bâti (Reijnders and Roekel, 1999) :

- (i) Les outils qualitatifs basés sur des points et des critères ;
- (ii) Les outils procédant à une analyse quantitative des intrants et des extrants en se basant sur une approche du cycle de vie.

Le premier groupe comporte des systèmes tels que le LEED (aux États-Unis), le BREAM (au Royaume-Uni) et GBTool (Initiative internationale pour un environnement bâti durable (iiSBE)). Également considérées comme des outils d'évaluation, ces méthodes consistent en général à réaliser un audit des bâtiments et à attribuer des points en fonction de paramètres prédéfinis. Bien qu'essentiellement qualitatifs, certains paramètres peuvent également être quantitatifs et même recourir à l'analyse du cycle de vie (ACV), principalement pour quantifier les crédits des matériaux. Ces systèmes servent en général à obtenir des certifications environnementales et des labels écologiques pour les bâtiments. Toutefois, ce type d'outil n'entre pas dans le cadre du présent document. Les paragraphes qui suivent s'attarderont donc sur le deuxième groupe d'outils, basés sur les analyses de cycle de vie.

L'ACV peut être appliquée directement au secteur de la construction. Toutefois, compte tenu de ses spécificités, appliquer une ACV standard aux bâtiments et autres constructions posent d'autres problèmes. Les causes principales sont les suivantes (IEA, 2001) :

- (i) Les bâtiments ont une longue durée de vie et celle-ci n'est pas connue précisément. Ces bâtiments sont donc soumis à de nombreux aléas ;
- (ii) Les bâtiments dépendent d'un site et bon nombre d'impacts sont locaux ;
- (iii) Les produits de construction sont généralement fabriqués à l'aide de matériaux composites, ce qui implique la collecte d'un grand nombre de données et de processus de fabrication associés ;
- (iv) La consommation d'énergie dans le cadre de la phase d'utilisation dépend dans une large mesure des utilisateurs et des techniques spéciales choisies.
- (v) Un bâtiment assure plusieurs fonctions ; il est donc difficile de choisir une unité fonctionnelle adéquate,
- (vi) Les bâtiments sont étroitement liés à d'autres éléments de l'environnement bâti, en particulier les infrastructures urbaines telles que les routes, les canalisations, les espaces verts et les installations de traitement ; par ailleurs, la réalisation d'une ACV sur un bâtiment isolé peut fortement induire des erreurs.

S'agissant de l'analyse du cycle de vie des bâtiments et de leurs composants, une distinction est faite entre d'une part les outils d'ACV conçus pour évaluer les matériaux et les composants d'un bâtiment (par ex. BEES (Lippiatt, 2002) et d'autre part les méthodes d'ACV visant à évaluer le bâtiment dans son ensemble (par ex. Athena (Trusty, 1997), Envest (Howard et al. 1999), EcoQuantum (Kortman et al. 1998)). Ces dernières sont généralement plus complexes puisque les performances globales du bâtiment sont fonction des interactions entre les

composants et sous-systèmes individuels ainsi que des interactions avec les occupants et l'environnement naturel. Le choix de l'outil adéquat dépend des objectifs environnementaux spécifiques du projet.

Un projet élaboré dans le cadre du réseau thématique européen PRESCO (Practical Recommendations for Sustainable Construction) a analysé la précision et la pertinence des outils d'ACV en tant qu'aide à la conception (Kellenberger, 2005). Ce projet a comparé plusieurs outils d'ACV sur la base d'études de cas afin d'harmoniser les outils d'évaluation fondés sur l'ACV pour les bâtiments. Une autre analyse comparative des outils d'évaluation environnementale de l'environnement bâti est proposée par Jönsson (2000) et Forsberg & von Malmborg (2004).

Comme indiqué précédemment, le présent document s'attarde sur l'ACV et plus spécifiquement sur son application aux structures en acier. Le cadre normatif d'une ACV est détaillé dans les sous-rubriques qui suivent. Les normes internationales ISO 14040 (2006) et ISO 14044 (2006), qui définissent le cadre général de l'ACV, sont d'abord présentées. Une description des nouvelles normes européennes régissant la contribution des travaux de construction au développement durable est ensuite proposée. Il convient de noter que si les normes internationales précitées ont une portée générale, les normes européennes se limitent à l'évaluation des travaux effectués sur les bâtiments et autres types de constructions.

2.3 Cadre normatif de l'ACV

Les normes internationales ISO 14040 (2006) et 14044 (2006) établissent le cadre, les principes et les exigences généraux qui sous-tendent la conduite des études d'ACV ainsi que l'élaboration des rapports les concernant. En ce qui concerne ces normes, l'analyse du cycle de vie doit comprendre la définition de l'objectif et du champ d'étude, l'analyse de l'inventaire, l'évaluation d'impact et l'interprétation des résultats. Comme illustré à la Fig. 2.2, les diverses phases sont interdépendantes et une procédure itérative s'impose parfois pour satisfaire au but et à l'objectif de l'étude. Les différentes étapes sont détaillées dans les sous-rubriques ci-après.

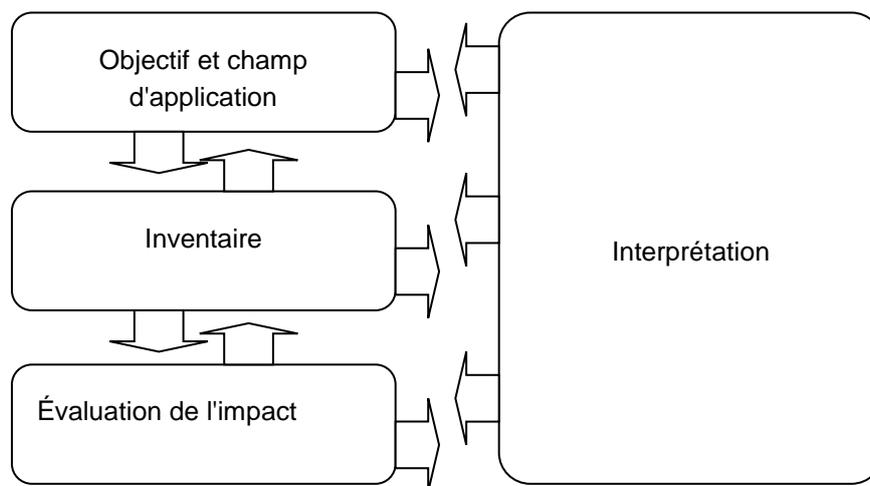


Fig. 2.2: Cadre général de l'ACV (ISO 14044:2006)

2.3.1 Définition de l'objectif et du champ de l'étude

La définition de l'objectif d'une analyse du cycle de vie doit indiquer sans ambiguïté l'application envisagée, les raisons conduisant à réaliser l'étude et le public concerné, c'est-à-dire les personnes auxquelles vont être communiqués les résultats de l'étude.

La définition du champ d'une ACV doit tenir compte et décrire clairement deux éléments principaux : l'unité fonctionnelle et les frontières du système.

2.3.1.1 Fonction et unité fonctionnelle

Le champ d'une analyse du cycle de vie doit clairement spécifier les fonctions du système étudié. Une unité fonctionnelle est la mesure de la performance des sortants fonctionnels du système de produits.

Le rôle principal d'une unité fonctionnelle est de fournir une référence par rapport à laquelle les entrants et les sortants seront liés. Cette référence est nécessaire pour assurer la compatibilité des résultats d'une analyse du cycle de vie. Le caractère comparable des résultats d'une ACV est particulièrement critique lors de l'évaluation de différents systèmes pour s'assurer que ces comparaisons sont effectuées sur une base commune.

2.3.1.2 Frontières du système

Les frontières du système déterminent les processus élémentaires qui doivent être inclus dans l'analyse du cycle de vie. Pour un matériau générique, une ACV du cycle de vie couvre toutes les étapes, de la production des matières premières à la fin de vie, comme le montre la Fig. 2.3.



Fig. 2.3: Processus d'une ACV d'un matériau générique

Lorsque l'analyse du cycle de vie porte uniquement sur les premières étapes de la production des matières, elle est dite « du berceau à la porte de l'usine ». Lorsque toutes les étapes du cycle sont prises en compte (de la production des matières premières jusqu'à la fin de vie), l'analyse est dite « du berceau à la tombe ». Lorsque le processus de recyclage est intégré dans la fin de vie et que les matières secondaires évitent toute production de nouvelles matières, on parle souvent d'une analyse de « berceau à berceau ».

Plusieurs facteurs déterminent les frontières du système, parmi lesquelles l'application envisagée de l'étude, les hypothèses formulées, les critères de coupure, les contraintes de données et de coûts, et le public concerné.

Le choix des entrants et des sortants, le niveau d'agrégation au sein d'une catégorie de données et la modélisation du système doivent être cohérents avec l'objectif de l'étude. Il convient de modéliser le système de sorte que les entrants et les sortants aux frontières soient des flux élémentaires.

2.3.1.3 Exigences relatives à la qualité des données

Afin de satisfaire à l'objectif et de respecter le champ d'application de l'analyse, la norme ISO 14044 exige que les données couvrent :

- les facteurs temporels : ancienneté des données et durée minimale pendant laquelle il convient que les données soient collectées ;
- la géographie : zone géographique où il convient que les données des processus élémentaires soient recueillies ;
- la technologie : technologie spécifique ou mélange de technologies ;
- la fidélité : mesure de la variabilité des valeurs de données pour chaque donnée exprimée (par exemple la variance) ;
- la complétude : pourcentage des flux mesurés ou estimés ;
- la représentativité : évaluation qualitative du degré auquel l'ensemble des données reflète la situation réelle ;
- la cohérence : évaluation qualitative de la manière dont la méthodologie de l'étude s'applique uniformément aux différents composants de l'analyse ;
- la reproductibilité : évaluation qualitative du degré auquel les informations concernant la méthodologie et les valeurs de données permettent à un réalisateur indépendant de reproduire les résultats signalés dans l'étude ;

- l'incertitude des informations, par exemple des données, des modèles et des hypothèses.

2.3.2 Analyse de l'inventaire du cycle de vie

L'analyse de l'inventaire met en œuvre le recueil des données et des procédures de calcul pour quantifier les entrants et sortants d'un système de produits. Ces entrants et sortants peuvent comprendre l'utilisation de ressources et les rejets dans l'air, l'eau et la terre associés au système.

Les données qualitatives et quantitatives à inclure dans l'inventaire doivent être recueillies pour chaque processus élémentaire inclus dans les frontières du système.

Le recueil des données peut être lourd en termes de moyens à y consacrer. Il convient de tenir compte des contraintes pratiques sur le recueil des données dans le champ de l'étude et de les noter dans les rapports de l'étude.

2.3.3 Évaluation de l'impact du cycle de vie

2.3.3.1 Méthode de calcul générale

L'évaluation des impacts d'une ACV vise à évaluer la portée des impacts potentiels environnementaux en utilisant les résultats de l'inventaire du cycle de vie. Pour ce processus, les données d'inventaire sont en général associées à des impacts environnementaux spécifiques. Il comporte deux volets :

- (i) Les éléments obligatoires, dont la classification et la caractérisation ;
- (ii) Les éléments facultatifs, tels que la normalisation, le classement, le regroupement et la pondération.

Pour la classification, il est nécessaire de sélectionner au préalable les catégories d'impact adéquates, en fonction de l'objectif de l'étude et d'attribuer les résultats de l'ICV aux catégories d'impact sélectionnées. Les facteurs de caractérisation, représentant la contribution relative du résultat d'un ICV au résultat de l'indicateur de la catégorie d'impact, sont ensuite appliqués. Selon cette méthode, les catégories d'impact sont des fonctions linéaires : les facteurs de caractérisation sont indépendantes de l'ampleur de l'intervention environnementale telle que mesurée par l'expression 2.1 :

$$impact_{cat} = \sum_i m_i \times charact_factor_{cat,i}$$

Éq. (2.1)

où m_i est la quantité de flux de l'inventaire i et $charact_factor_{cat,i}$ est le facteur de caractérisation du flux d'inventaire i pour la catégorie d'impact.

En fonction des étapes facultatives de l'ACV, la normalisation est en général nécessaire pour indiquer dans quelle mesure une catégorie d'impact contribue à l'impact environnemental global. Dans le cadre de la pondération, les résultats de l'indicateur normalisé pour chaque catégorie d'impact sont des facteurs numériques affectés en fonction de leur importance relative. La pondération repose sur des choix de valeur et non sur les sciences naturelles ; dès lors, la norme ISO 14044 distingue les applications internes et externes. Par ailleurs, si les résultats sont destinés à être comparés ou présentés au public, aucune pondération ne doit être appliquée.

Le regroupement est une autre étape facultative de l'analyse du cycle de vie dans le cadre de laquelle les catégories d'impact sont réunies dans un ou plusieurs ensembles. Selon la norme ISO 14044, deux procédures peuvent être appliquées : trier les catégories d'impact sur une base nominale et classer les catégories d'impact selon une hiérarchie donnée.

Le présent document vise à décrire les étapes obligatoires de l'ACV. Dès lors, les éléments facultatifs évoqués ci-dessus ne seront plus considérés dans la suite de ce document.

2.3.3.2 Calcul des impacts environnementaux potentiels

Une ACV vise donc à analyser les impacts environnementaux possibles des intrants et des émissions identifiés. Les paragraphes qui suivent proposent une brève introduction des catégories environnementales les plus courantes de l'ACV, de même que la méthode de calcul respective adoptée dans le cadre de l'approche simplifiée décrite dans le présent document.

2.3.3.2.1 Potentiel de réchauffement global (GWP)

L'"effet de serre", représenté illustré à la Fig. 2.4 résulte des gaz actifs infrarouges (IR), naturellement présents dans l'atmosphère terrestre (par ex. H₂O, CO₂ et O₃). Ils absorbent l'énergie (ou le rayonnement) (infrarouge) terrestre quittant la Terre et réfléchissent une partie de cette chaleur vers cette dernière, contribuant ainsi au réchauffement de la surface et de la troposphère.

La concentration de ces gaz, également dénommés gaz à effet de serre, ne cesse de d'augmenter depuis l'ère industrielle et renforce l'effet de serre naturel de la Terre. Il en résulte une hausse des températures à la surface de la Terre qui suscite bien des inquiétudes quant aux changements climatiques qu'elle est susceptible d'occasionner.

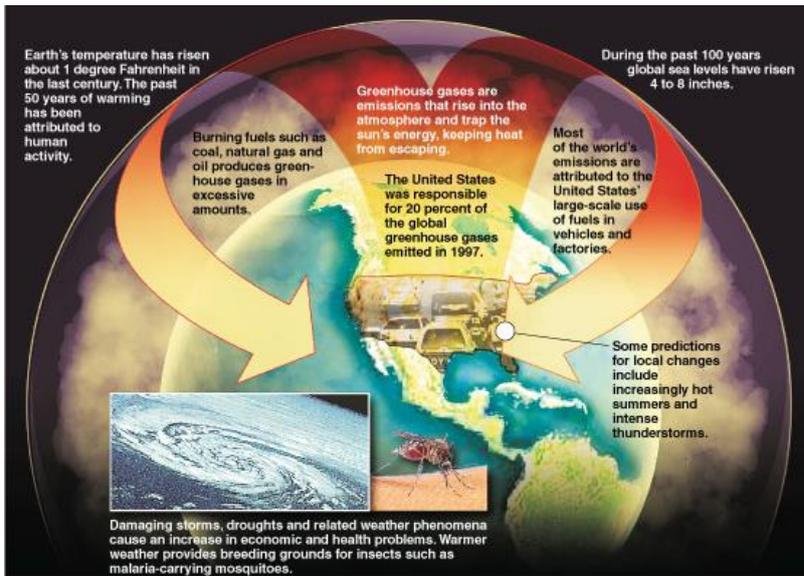


Fig. 2.4: Réchauffement global (EPS, 2009)

Tous les gaz à effet de serre ne sont pas identiques. Si le CO₂ est le plus répandu d'entre eux, plusieurs autres gaz contribuent de la même manière aux changements climatiques. L'impact des différents gaz à effet de serre est indiqué par le potentiel de réchauffement global (GWP).

Le GWP est une mesure relative de la quantité de CO₂ qui doit être libérée pour avoir le même effet de forçage radiatif qu'1 kg de gaz à effet de serre au cours d'une période spécifique. Le GWP est donc une méthode de quantification de l'impact potentiel d'un gaz particulier sur le réchauffement global.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a calculé des GWP sur des périodes de 20, 100 et 500 ans. Ces GWP sont repris au Tableau 2.1 pour trois des gaz à effet de serre les plus importants et pour les trois périodes indiquées.

Tableau 2.1 – GWP pour les périodes données (en kg CO₂ éq./kg) (GIEC, 2007)

	20 ans	100 ans	500 ans
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1	1	1
Méthane (CH ₄)	62	25	7
Oxyde nitreux (N ₂ O)	275	298	156

Dès lors, selon l'expression (2.2), l'indicateur « Réchauffement global » est calculé comme suit :

$$\text{Réchauffement global} = \sum_i GWP_i \times m_i$$

Éq. (2.2)

où m_i est la masse de substance i libérée (en kg). Cet indicateur est exprimé en *kg de CO₂ équivalents*.

La méthode adoptée tient compte uniquement d'une période de 100 ans.

2.3.3.2 Potentiel de destruction de la couche d'ozone (ODP)

Les gaz destructeurs d'ozone endommagent l'ozone stratosphérique ou la "couche d'ozone" en libérant des radicaux libres qui décomposent l'ozone (O₃).

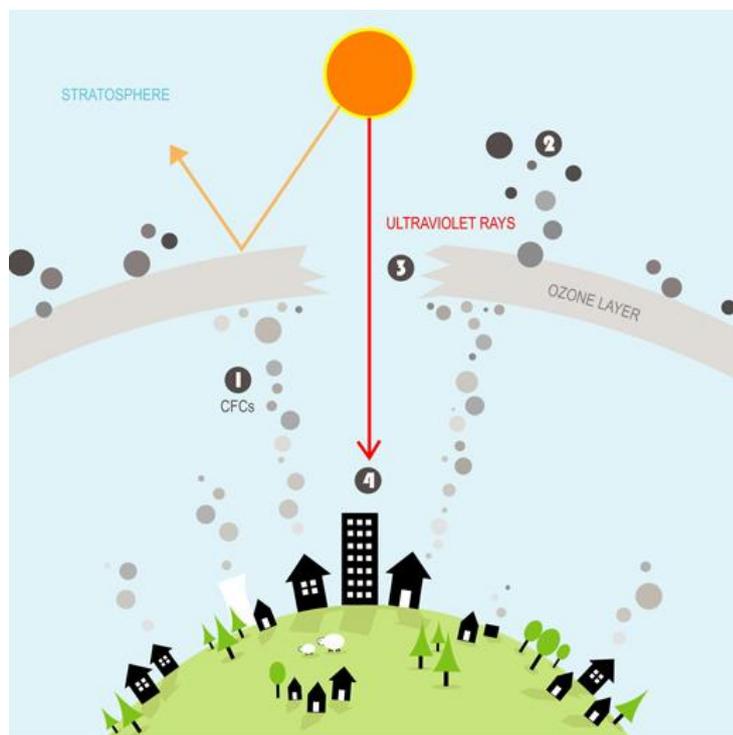


Fig. 2.5: Destruction de l'ozone (BlendSpace, 2013)

La détérioration de la couche d'ozone réduit sa capacité à prévenir la pénétration de la lumière ultraviolette (UV) dans l'atmosphère terrestre, ce qui augmente la quantité d'ultraviolets cancérogènes frappant la surface terrestre.

Cela expose les êtres humains à des problèmes de santé comme le cancer de la peau ou des cataractes, et les animaux et les cultures à des dégâts liés au soleil.

Les chlorofluorocarbones et les hydrocarbures chlorofluorés (HCFC) comptent parmi les principaux gaz destructeurs de la couche d'ozone.

Les inquiétudes croissantes dans les années 80 ont débouché sur des initiatives à l'échelle planétaire visant à endiguer l'appauvrissement de la couche d'ozone, le protocole de Montréal - qui a interdit la plupart des gaz les plus destructeurs de l'ozone - en étant le point d'orgue.

Le potentiel de destruction de la couche d'ozone s'exprime par le rapport entre la perte globale d'ozone occasionnée par une substance et la perte globale d'ozone occasionnée par la substance de référence, le CFC-11. Le modèle de caractérisation a été développé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et définit le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) de différents gaz. Tablant sur leur constance, les ODP de certaines substances sont indiqués dans le

Tableau 2.2 (Heijungs et al., 1999).

Tableau 2.2 – PAO pour certaines substances (en kg CFC-11 éq./kg) (Heijungs et al., 1999)

	Constance (t ≈:)
CFC-11	1
CFC-10	1,2
Halon 1211	6,0
Halon 1301	12,0

L'indicateur « Destruction de la couche d'ozone » est donc calculé comme suit :

$$Destruction\ delacouche\ d'ozone = \sum_i ODP_i \times m_i$$

Éq. (2.3)

où m_i est la masse de substance i libérée (en kg). Cet indicateur est exprimé en *kg d'équivalents CFC-11*.

2.3.3.2.3 Potentiel d'acidification (PA)

L'acidification est le processus de transformation de la pollution de l'air (essentiellement l'ammoniac (NH₃), du dioxyde de soufre (SO₂) et des oxydes d'azote (NO_x)) en substances acides, comme le montre la Fig. 2.6. Les composés acidifiants émis dans l'atmosphère sont transportés par le vent et retombent sous la forme de particules acides voire de pluie ou de neige acide. Lorsque cette pluie s'abat, souvent à une distance considérable de la source du gaz, elle endommage l'écosystème à des degrés divers, en fonction de la nature des écosystèmes paysagers.

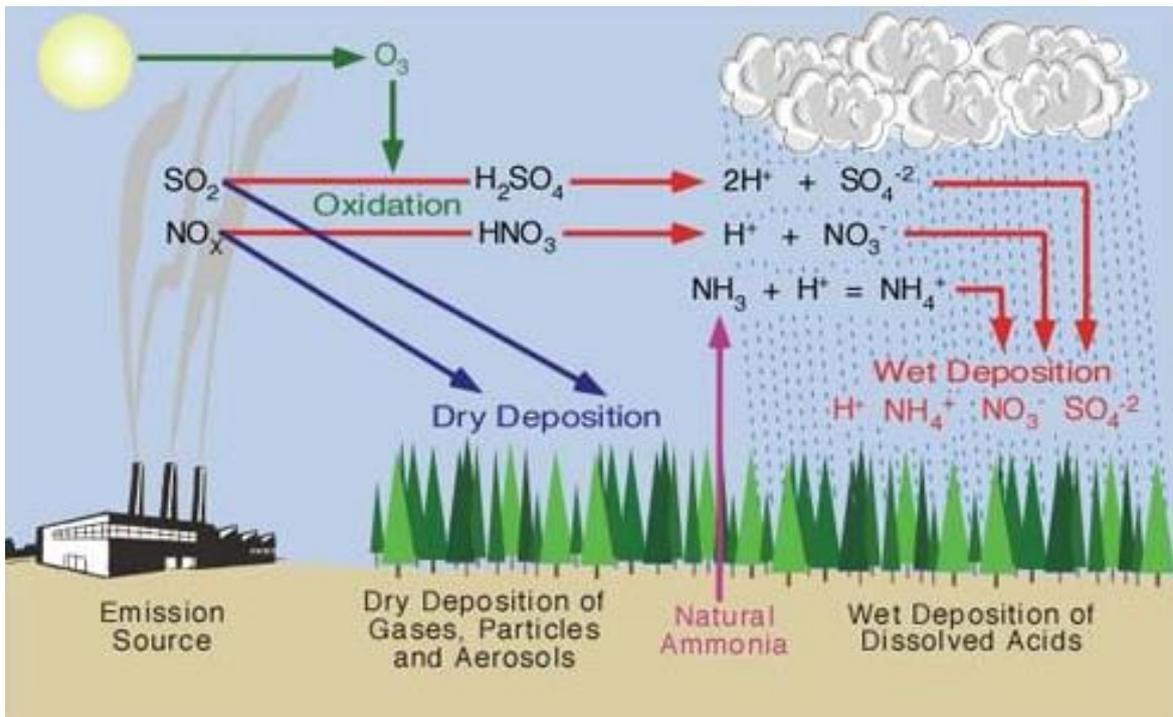


Fig. 2.6: Potentiel d'acidification (La bibliothèque de l'énergie, 2013)

Le potentiel d'acidification se mesure par la capacité d'une substance à libérer des ions H^+ qui provoquent l'acidification. Il peut également être mesuré en fonction de la libération d'une quantité équivalente de SO_2 .

Les facteurs de caractérisation adoptés dans cet ouvrage sont basés sur le modèle RAINS-LCA qui tient compte du sort ainsi que des dépôts et des effets naturels (Huijbregts, 2001). Les facteurs de caractérisation moyens de l'UE pour l'acidification sont précisés au Tableau 2.3.

Tableau 2.3 – Potentiels d'acidification (en kg d'éq. SO_2) (Huijbregts, 2001)

	Ammoniac (NH_3)	Oxyde d'azote (NO_x)	Dioxyde de soufre (SO_2)
AP _i	1,60	0,50	1,20

L'indicateur d'acidification est donc calculé comme suit :

$$\text{Acidification} = \sum_i AP_i \times m_i$$

Éq. (2.4)

où m_i est la masse de substance i libérée (en kg). Cet indicateur est exprimé en *kg d'équivalents SO_2* .

2.3.3.2.4 Potentiel d'eutrophisation (PE)

Des éléments fertilisants, tels que les nitrates et les phosphates, sont généralement ajoutés au sol dans le cadre de la fertilisation afin de stimuler la croissance des plantes et des produits agricoles. Bien que ces substances nutritives soient essentielles à la vie, lorsqu'elles se retrouvent dans des zones d'eau ou terrestres naturelles sensibles, cette fertilisation involontaire peut occasionner une surproduction de plantes ou d'algues, laquelle peut étouffer d'autres organismes qui meurent et commencent à se décomposer. Dès lors, l'eutrophisation - l'enrichissement en éléments nutritifs - illustrée à la Fig. 2.7, peut être considérée comme un enrichissement excessif des cours d'eau. Elle peut endommager les écosystèmes, en augmentant la mortalité de la faune et de la flore aquatiques de même qu'entraîner la disparition d'espèces tributaires des environnements pauvres en nutriments. La biodiversité de ces environnements s'en ressent globalement, ce qui a des répercussions sur les animaux non-aquatiques et les êtres humains tributaires de ces écosystèmes.

L'eutrophisation est mesurée selon le kilogramme équivalent azote ou phosphate en guise d'unité de référence. En l'état, elle détermine dans quelle mesure une substance dans l'eau peut provoquer une prolifération des algues, l'azote ou le phosphate étant la substance de référence. Les principaux responsables de l'eutrophisation sont les composés d'azote, tels que les nitrates, l'ammoniac, l'acide nitrique et les composés phosphoriques dont les phosphates et l'acide phosphorique.

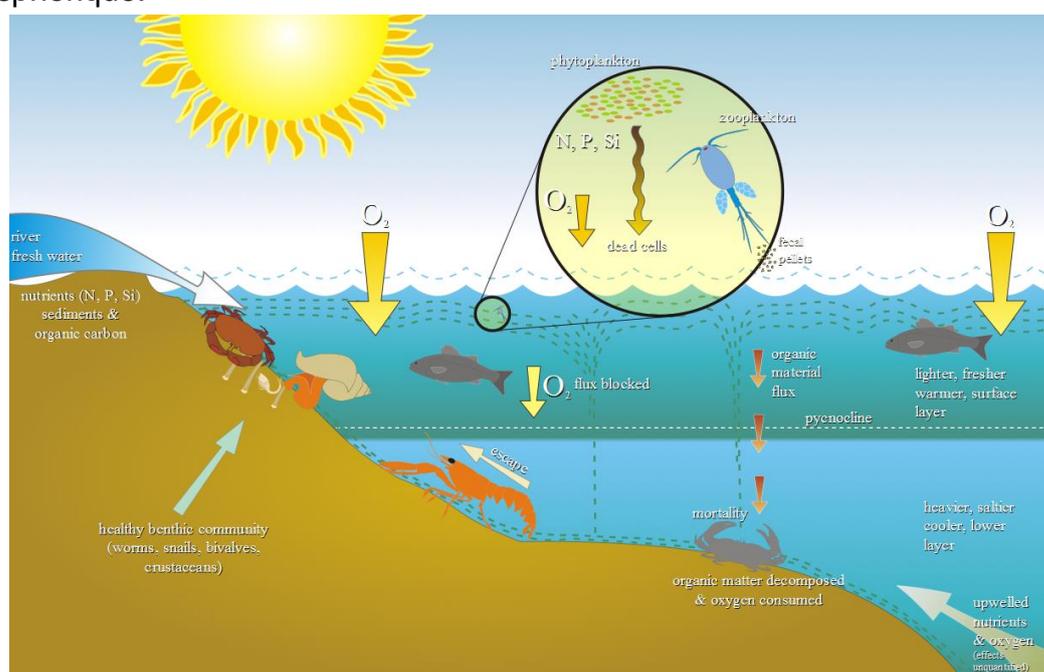


Fig. 2.7: Potentiel d'eutrophisation (Wikipédia, 2013a)

Ayant le phosphate comme substance de référence, les facteurs de caractérisation des substances sélectionnées sont précisés au Tableau 2.4 (Heijungs et al., 1999).

Tableau 2.4 – potentiels d'eutrophisation (en kg d'éq. PO_4^{3-}) (Heijungs et al., 1999)

	Ammoniac (NH_3)	Oxyde d'azote (NO_x)	Nitrate (N)	Phosphate (P)
EP _i	0,35	0,13	0,10	1,00

L'indicateur d'eutrophisation est donc calculé comme suit :

$$Eutrophisation = \sum_i EP_i \times m_i$$

Éq. (2.5)

où m_i (kg) est la quantité de substance i libérée dans l'air, l'eau ou le sol. Cet indicateur est exprimé en kgPO_4^{3-} d'équivalents.

2.3.3.2.5 Potentiel de création d'ozone photochimique (POCP)

Les atmosphères contenant des oxydes d'azote (NO_x), un polluant courant, ainsi que des composés organiques volatils (COV), peuvent générer de l'ozone et d'autres polluants atmosphériques en présence de la lumière du soleil. Bien que l'ozone soit essentiel dans la haute atmosphère pour assurer une protection contre le rayonnement ultraviolet (UV), l'ozone troposphérique est partiellement responsable notamment de l'endommagement des récoltes, de la recrudescence des cas d'asthme et d'autres affections respiratoires.

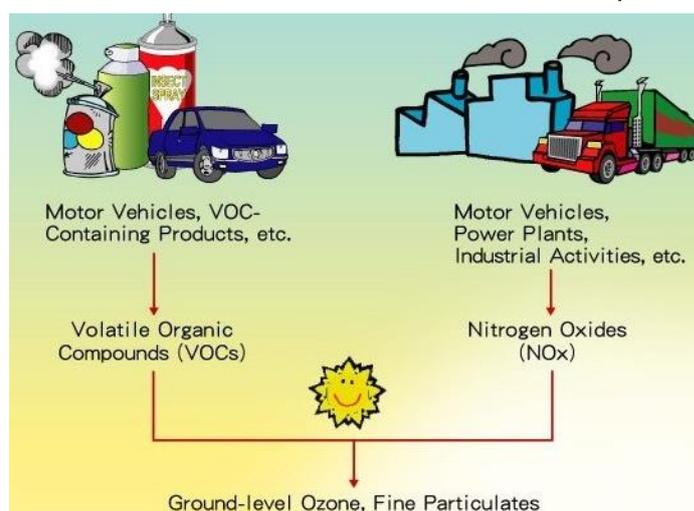


Fig. 2.8: Potentiel de création d'ozone photochimique (EDP, 2013)

Les smogs d'été recouvrant certaines grandes villes telles que Los Angeles ou Pékin sont la manifestation la plus courante des effets résultant de taux élevés de gaz qui contribuent au POCP. La combustion de combustibles est la principale source d'émissions d'oxyde d'azote, les COV étant quant à eux principalement émis par des solvants, largement utilisés dans les peintures et les revêtements.

La catégorie d'impact POCP mesure la capacité relative d'une substance à produire de l'ozone en présence d'oxyde d'azote (NO_x) et de la lumière du soleil. Le POCP est formulé en utilisant l'éthylène comme substance de référence. Les facteurs de caractérisation pour le POCP ont été définis sur la base du modèle à trajectoires de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe (CEE-ONU).

Les *POCP* ont été calculés pour deux scénarios (Heijungs et al., 1999) :

- (i) une concentration de fond relativement élevée en NO_x ;
- (ii) une concentration de fond relativement faible en NO_x .

Ces deux facteurs de caractérisation sont indiqués au Tableau 2.5 pour certaines substances.

Tableau 2.5 – *POCP* pour différentes concentrations de NO_x et certaines substances (en kg C_2H_4 éq./kg) (Heijungs et al., 1999)

	Élevée- POCP du NO_x	Faible- POCP du NO_x
Acétaldéhyde (CH_3CHO)	0,641	0,200
Butane (C_4H_{10})	0,352	0,500
Monoxyde de carbone (CO)	0,027	0,040
Éthyne (C_2H_2)	0,085	0,400
Méthane (CH_4)	0,006	0,007
Oxyde d'azote (NO_x)	0,028	Pas de données
Propène (C_3H_6)	1,123	0,600
Oxyde de soufre (SO_x)	0,048	Pas de données
Toluène ($C_6H_5CH_3$)	0,637	0,500

L'indicateur de la formation de photo-oxydants est donc calculé comme suit :

$$Formation_{photo - oxydants} = \sum_i POCP_i \times m_i$$

Éq. (2.6)

où m_i est la masse de substance i libérée (en kg). Cet indicateur est exprimé en *kg d'équivalents éthylène (C_2H_4)*.

La méthode adoptée tient uniquement compte des facteurs de caractérisation liés au scénario présentant une forte concentration ambiante de NO_x .

2.3.3.2.6 Potentiel d'épuisement abiotique

Les indicateurs de l'épuisement abiotique visent à rendre compte de la raréfaction des ressources non renouvelables résultant de leur extraction et de leur rareté intrinsèque. Deux types d'indicateur sont ici examinés :

- ADP-éléments concernant l'extraction des ressources limitées (et leurs minerais) ;

- ADP-énergie/combustibles fossiles, concernant l'utilisation de combustibles fossiles sous forme de carburant ou de matière première.



Fig. 2.9: Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques (Wikipédia, 2013b)

Le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques élémentaires ($ADP_{\text{éléments}}$) est calculé pour chaque extraction d'éléments en fonction des réserves résiduelles et du taux d'extraction. Le potentiel d'épuisement abiotique est fonction du rapport réserves de production/ultimes, comparé à l'antimoine, choisi comme substance de référence (Sb) (Guinée et al., 2002). Différentes mesures utilisent les réserves économiques ou ultimes que renferme l'écorce terrestre.

Dès lors, le potentiel d'épuisement abiotique (éléments) de la ressource i (ADP_i) est indiqué par le rapport entre la quantité de ressources extraites et les réserves exploitables de cette ressource, exprimé en kg de la ressource de référence, l'antimoine. Les facteurs de caractérisation de certaines ressources sont repris au Tableau 2.6.

Tableau 2.6 Potentiel d'épuisement abiotique de certains éléments (en éq Sb/kg) (Guinée et al., 2002)

Ressource	ADP-élément
Aluminium	1.09E-09
Cadmium	1.57E-01
Cuivre	1.37E-03
Fer	5.24E-08
Plomb	6.34E-03

L'indicateur d'épuisement abiotique est donc déterminé comme suit :

$$\text{Épuisement abiotique} = \sum_i ADP_i \times m_i$$

Éq. (2.7)

où m_i est la quantité de la ressource i extraite (en kg). Cet indicateur est exprimé en *kg d'antimoine* (la ressource de référence).

Les combustibles fossiles ont été mesurés de la même manière, mais leur mode de calcul est légèrement différent depuis 2010. Dans le cas présent, une mesure absolue est prise en compte, basée sur la teneur énergétique du combustible fossile (Guinée et al., 2002). Elle ne tient pas compte de la rareté relative des différents combustibles fossiles étant donné que ces derniers sont en grande partie des ressources transférables. Dans la réalité, ces dernières ne varient que de 17% entre le charbon (le plus répandu) et le gaz (le plus rare). L'indicateur "Épuisement abiotique fossile" est exprimé en MJ.

2.3.4 Interprétation du cycle de vie

L'interprétation du cycle de vie est la dernière phase de l'ACV. À ce stade, les résultats de l'inventaire ou de l'évaluation de l'impact sont regroupés. Cette phase vise essentiellement à formuler les conclusions qui peuvent être dégagées des résultats de l'ACV. Par ailleurs, il convient d'analyser les résultats des phases précédentes de l'ACV et les choix opérés tout au long du processus ; en effet, les affirmations, les modèles, les paramètres et les données utilisées dans l'ACV doivent être conformes à la définition des objectifs et du champ de l'étude.

2.3.5 Exemple illustratif

Afin d'illustrer les différentes étapes de l'analyse du cycle de vie décrites dans les paragraphes précédents, un petit exemple est ici proposé.

En supposant que la production d'1 kg d'un matériau isolant a généré les émissions suivantes (voir Tableau 2.7) au cours de la phase d'inventaire :

Tableau 2.7 – Émissions résultant de la production d'1 kg d'un matériau isolant

Émissions	Valeur (en kg)
Monoxyde de carbone (CO)	0,12
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,60
Ammoniac (NH ₃)	0,01
Méthane (CH ₄)	0,05
oxydes d'azote (NO _x)	1,02
Phosphore (P)	0,35
Dioxyde de soufre (SO ₂)	0,10

Pour l'étape suivante, l'évaluation de l'impact, les catégories environnementales sélectionnées sont par exemple :

- (i) potentiel de réchauffement global (GWP)
- (ii) potentiel d'acidification (PA)
- (iii) potentiel d'eutrophisation (PE)

Les facteurs de caractérisation de chaque émission pour chacune des catégories environnementales sont spécifiés au Tableau 2.8.

Tableau 2.8 – Facteurs de caractérisation pour les catégories environnementales spécifiques

	GWP	PA	PE
	(kg d'éq. CO₂)	(kg d'éq. SO₂)	(kg d'éq. PO₄)
Monoxyde de carbone (CO)	1,53	-	-
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1,00	-	-
Ammoniac (NH ₃)	-	1,60	0,35
Méthane (CH ₄)	25,00	-	-
Oxydes d'azote (NO _x)	-	0,50	0,13
Phosphore (P)	-	-	3,06
Dioxyde de soufre (SO ₂)	-	1,20	-

Les résultats de chaque catégorie environnementale sont obtenus en multipliant chaque émission par son facteur de caractérisation respectif (par ex. pour le GWP : $0,12 \times 1,53 + 0,60 \times 1,00 + 0,05 \times 23 = 1,93$ kg d'éq. CO₂), ce qui permet d'obtenir les résultats indiqués au Tableau 2.9.

Tableau 2.9 – Résultats finaux des indicateurs environnementaux sélectionnés

GWP (kg d'éq. CO₂)	PA (kg d'éq. SO₂)	PE (kg d'éq. PO₄)
1,93	0,65	1,21

2.4 Normes européennes relatives à l'analyse du cycle de vie des bâtiments

2.4.1 CEN/TC 350

Le Comité européen de normalisation (CEN) a été mandaté en 2004 pour élaborer des méthodes horizontales normalisées afin d'évaluer les performances environnementales intégrées des bâtiments.

Le CEN/TC 350 a élargi ce mandat à la durabilité et a décidé de baser toutes les évaluations sur une approche du cycle de vie. Le Comité Technique élabore donc des normes, des rapports et des spécifications techniques afin de définir la méthodologie et les indicateurs de l'évaluation de la durabilité des bâtiments.

Le cadre normatif de l'évaluation de la durabilité des bâtiments, établi par la série de normes du CEN-TC 350, traite des aspects environnementaux, économiques et sociaux (EN 15643-1, 2010), comme le montre la Fig. 2.10.

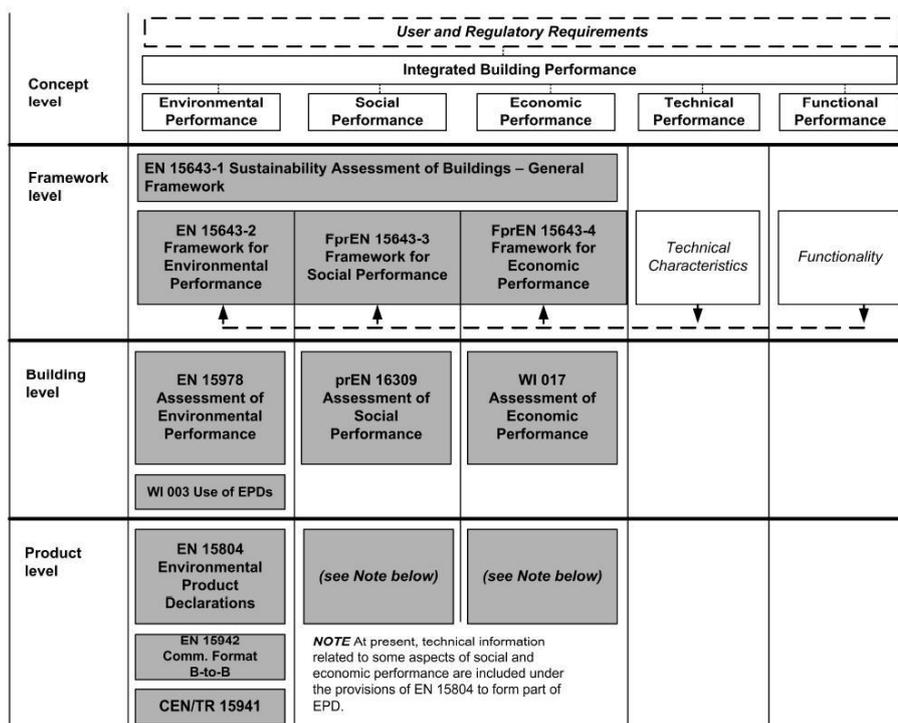


Fig. 2.10: Programme de travail du CEN/TC 350 (EN 15643-1, 2010)

La Fig. 2.10 indique que le CT travaille à quatre niveaux (concept/ cadre/ bâtiment/ produit) et sur cinq types de performance (environnementale/ sociale/ économique/ technique/ fonctionnelle). L'évaluation environnementale est l'aspect le plus abouti, des normes étant définies au niveau du bâtiment et du produit.

L'approche environnementale du cycle de vie adoptée dans ce projet respecte les deux normes spécifiques à l'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments : les normes EN 15978 (2011) et EN 15804 (2012), qui se concentrent respectivement au niveau du bâtiment et des matériaux.

2.4.2 Au niveau du bâtiment (EN 15978)

La norme EN 15978 (2011) stipule les règles de calcul pour l'évaluation de la performance environnementale des bâtiments nouveaux et existants selon une approche du cycle de vie. Elle vise donc à soutenir le processus décisionnel et la documentation de l'évaluation de la performance environnementale d'un bâtiment. Il est recommandé de prendre connaissance de la norme pour un aperçu complet de la méthodologie. La présente rubrique vise à décrire les aspects primordiaux suivants : l'équivalent fonctionnel, les étapes du cycle de vie et les indicateurs environnementaux.

2.4.2.1 L'équivalent fonctionnel

La norme définit l'équivalent fonctionnel comme correspondant aux « exigences fonctionnelles et/ou exigences techniques quantifiées pour un bâtiment ou un système assemblé (partie d'ouvrage), destinées à être utilisées comme base de référence pour la comparaison ». La comparaison entre des bâtiments ou des systèmes ne sera donc acceptable que si les fonctions fournies sont similaires. L'équivalent fonctionnel d'un bâtiment doit inclure, mais sans s'y limiter, des informations sur les aspects suivants :

- (i) type du bâtiment (résidentiel, bureaux, etc.)
- (ii) profil d'utilisation ;
- (iii) exigences techniques et fonctionnelles pertinentes ; et
- (iv) durée de vie requise.

2.4.2.2 Étapes du cycle de vie

Les frontières du système déterminent le champ d'application de l'analyse du cycle de vie, à savoir les processus inclus dans l'analyse. Comme l'indique la norme, l'évaluation environnementale « inclut tous les processus en amont et en aval nécessaires pour établir et préserver les fonctions du bâtiment ».

Il est bien entendu nécessaire de disposer d'informations sur les produits intégrés au bâtiment pour évaluer la performance environnementale au niveau du bâtiment. Les informations doivent être cohérentes et donc respecter les règles de catégorie définies dans la norme EN 15804 (voir la sous-rubrique suivante).

Dans cette norme, le cycle de vie du bâtiment est représenté par un concept modulaire, tel qu'illustré à la Fig. 2.11.

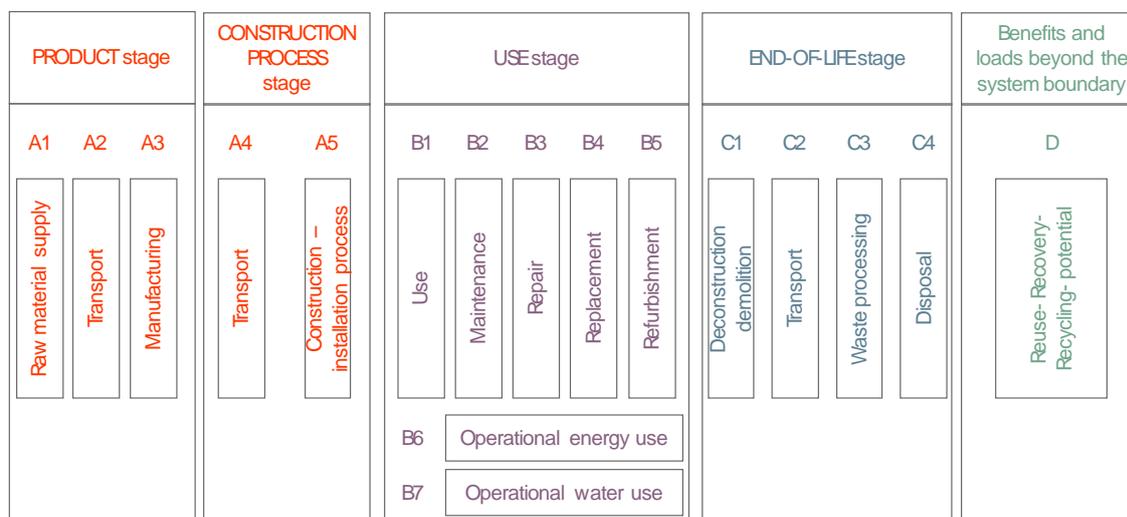


Fig. 2.11: Modules du cycle de vie d'un bâtiment (EN 15978, 2011)

La phase de production comprend les modules A1 à A3, la phase de construction les modules A4 et A5, la phase d'utilisation les modules B1 à B7 et la phase de fin de vie les modules C1 à C4 ; le module D porte quant à lui sur les bénéfices et les charges au-delà de la frontière du système de produits. Les paragraphes qui suivent décrivent brièvement chacune des phases et les modules correspondants.

2.4.2.2.1 Phase de production des produits

La phase de production des produits inclut les modules A1 à A3. Les frontières du système avec la nature sont définies de manière à inclure les processus qui fournissent les intrants de matières et d'énergie dans le système et les processus ultérieurs de fabrication et de transport jusqu'à la porte de l'usine ainsi que le traitement de tous les déchets engendrés par ces processus. Voici ce que couvre cette phase :

- ✓ A1 - Extraction et traitement des matières premières, réutilisation de produits ou de matières provenant d'un système de produits précédent, traitement de matériaux secondaires utilisés comme intrants pour la fabrication du produit ;
- ✓ A2 - Transport jusqu'à la porte de l'usine et transport interne ;
- ✓ A3 - Production d'intrants auxiliaires, fabrication de produits et de co-produits et fabrication d'emballages.

2.4.2.2.2 Phase de construction

La phase des processus de construction comprend les modules optionnels concernant ce qui suit :

- ✓ A4 - Transport de la porte de l'usine jusqu'au site de construction ;
- ✓ A5 - Installation du produit dans le bâtiment, y compris la fabrication et le transport des intrants auxiliaires et l'énergie ou l'eau nécessaire à l'installation ou au fonctionnement du site de construction. Elle comprend également les opérations sur site relatives au produit.

2.4.2.2.3 Phase d'utilisation

La phase d'utilisation inclut deux types de modules. Les modules liés à la structure du bâtiment (modules B1-B5) et les modules liés à l'exploitation du bâtiment (modules B6-B7) :

- ✓ B1 - Utilisation ou application du produit installé en termes d'émissions dans l'environnement des composants du bâtiment et de l'ouvrage de construction pendant leur utilisation normale (c'est-à-dire prévue).
- ✓ B2 - Le module « Maintenance » couvre la combinaison de toutes les actions techniques et administratives associées planifiées pendant la durée de vie pour maintenir le produit installé dans un bâtiment, un ouvrage de construction ou une partie de ceux-ci, dans un état dans lequel il peut offrir les performances fonctionnelles et techniques requises, ainsi que pour préserver les qualités esthétiques du produit.
- ✓ B3 - Le module « réparation » couvre la combinaison de toutes les actions techniques et administratives associées pendant la durée de vie associées au traitement correctif et préventif d'un produit de construction ou de ses parties installés dans le bâtiment ou l'ouvrage de construction afin qu'il retrouve un état acceptable lui permettant d'assurer ses performances fonctionnelle et technique requises.
- ✓ B4 - Le module « remplacement » couvre la combinaison de toutes les actions techniques et administratives associées pendant la durée de vie associées au retour d'un produit de construction à un état lui permettant d'assurer les performances fonctionnelles ou techniques requises, par le remplacement de l'ensemble de l'élément de construction.
- ✓ B5 - Le module « réhabilitation » couvre la combinaison de toutes les actions techniques et administratives associées pendant la durée de vie d'un produit, associées au retour d'un bâtiment dans un état leur permettant d'assurer les fonctions requises.
- ✓ B6 - Énergie consommée pour le fonctionnement des systèmes techniques intégrés du bâtiment ainsi que les aspects et impacts environnementaux qui leur sont associés, y compris le traitement et le transport des déchets engendrés sur le site par l'utilisation de l'énergie.

- ✓ B7 - Eau consommée par les systèmes techniques intégrés du bâtiment en phase opérationnelle ainsi que les aspects et impacts environnementaux associés compte tenu du cycle de vie de l'eau, y compris la production et le transport de l'eau et le traitement des eaux usées.

2.4.2.2.4 La phase de fin de vie

La phase de fin de vie du bâtiment inclut tous les extrants issus du démontage, de la déconstruction ou de la démolition du bâtiment qui ont atteint le statut « fin de déchets ». La phase de fin de vie comprend les modules d'informations facultatifs suivants :

- ✓ C1 - Déconstruction, y compris démontage ou démolition, du produit du bâtiment, incluant le tri initial des matériaux sur le site.
- ✓ C2 - Transport du produit mis au rebut dans le cadre du traitement des déchets, par exemple vers un site de recyclage, et transport des déchets, par exemple pour son élimination finale.
- ✓ C3 - Traitement des déchets, par exemple collecte de fractions de déchets provenant de la déconstruction et traitement des déchets de flux de matières en vue d'une réutilisation, d'un recyclage et d'une récupération d'énergie.
- ✓ C4 - Élimination des déchets, y compris le prétraitement physique et la gestion du site d'élimination.

2.4.2.2.5 Bénéfices et charges au-delà des frontières du système de produits

Le module D inclut tous les bénéfices ou les charges nets engendrés par les produits réutilisables, les matières recyclables et/ou les vecteurs énergétiques quittant un système de produits, par exemple sous forme de matières ou combustibles secondaires.

2.4.2.3 Évaluation de l'impact du cycle de vie

Pour la phase de l'évaluation de l'impact du cycle de vie, deux types de catégorie environnementale sont examinés, selon la norme EN 1987 : les indicateurs environnementaux décrivant les impacts environnementaux et les indicateurs décrivant les flux entrants et sortants. Les deux types d'indicateur font l'objet des paragraphes qui suivent.

2.4.2.3.1 Indicateurs décrivant les impacts environnementaux

Six indicateurs sont proposés pour décrire les impacts sur l'environnement naturel. Ils sont détaillés au Tableau 2.10.

Tableau 2.10 – Indicateurs décrivant les impacts environnementaux (EN15978)

Indicateur	Unité
Potentiel de réchauffement global, GWP	kg d'équiv. CO ₂
Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique, ODP	kg d'équiv. CFC 11
Potentiel d'acidification des sols et de l'eau, PA	kg d'équiv. SO ₂ ⁻
Potentiel d'eutrophisation, PE	kg d'équiv. (PO ₄) ³⁻
Potentiel de formation d'ozone troposphérique, POCP	kg d'équiv. éthène
Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques non fossiles ; (ADP-éléments)	kg d'équiv. Sb
Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques fossiles (ADP-combustibles fossiles)	MJ

Ces indicateurs ont déjà été présentés dans la section précédente de ce document.

2.4.2.3.2 Indicateurs décrivant les flux entrants et sortants

D'autres indicateurs décrivent les flux entrants et sortants. Ceux décrivant l'utilisation des ressources sont répertoriés au Tableau 2.11. Ils précisent l'utilisation des ressources en eau et en énergie primaire renouvelables et non-renouvelables et sont directement calculés à partir des flux entrants de l'ICV.

Tableau 2.11 – Indicateurs décrivant l'utilisation des ressources (EN15978)

Indicateur	Unité
Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières	MJ, pouvoir calorifique net
Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ, pouvoir calorifique net
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ, pouvoir calorifique net
Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ, pouvoir calorifique net
Utilisation de matière secondaire	kg
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ
Utilisation nette d'eau douce	m ³

Par ailleurs, les paramètres décrivant les catégories de déchets et les flux sortants sont directement basés sur les flux entrants issus de l'ICV. Les premiers sont stipulés au Tableau 2.12 et les seconds au

Tableau 2.13. Par ailleurs, pour ce qui est de la quantification de ces indicateurs, des scénarios sont établis pour les processus et les phases concernés.

Tableau 2.12 – Indicateurs décrivant les catégories de déchets (EN15978)

Indicateur	Unité
Déchets dangereux éliminés	kg
Déchets non-dangereux éliminés	kg
Déchets radioactifs éliminés	kg

Tableau 2.13 – Indicateurs décrivant les flux sortants quittant le système (EN15978)

Indicateur	Unité
Composants destinés à la réutilisation	kg
Matériaux destinés au recyclage	kg
Matériaux destinés à la récupération d'énergie (autre que l'incinération de déchets)	kg
Énergie fournie à l'extérieur	MJ par vecteur énergétique

2.4.3 Au niveau du produit (EN 15804)

Au niveau du produit, la norme 15804 définit les règles de catégories de produit (RCP) à respecter pour l'élaboration des Déclarations environnementales des produits (DEP) spécifiques aux produits de construction. Selon la norme ISO 14025 (2006), les EPD sont des déclarations environnementales de Type III et constituent souvent une bonne source de données environnementales pour une analyse du cycle de vie.

Une EPD est un type d'ACV particulier, réalisé en fonction d'un tronc commun de RCP, tel qu'illustré à la Fig. 2.12. De nombreuses RCP peuvent être utilisées pour les produits de construction (CPA, 2012) mais seuls les EPD respectant les mêmes RCP sont comparables.



Fig. 2.12: Processus EPD tel que décrit par la CPA (2012)

L'ensemble commun de règles de la norme EN 15804 a pour objectif de fournir à l'évaluateur des informations fiables, comparables et cohérentes permettant une agrégation au niveau du bâtiment.

Les règles de calcul applicables à l'ACV au niveau du matériau sont similaires à celles décrites précédemment au niveau du bâtiment. Une ACV réalisée au niveau des matériaux peut avoir le même champ d'application que celle décrite au niveau du bâtiment (voir Fig. 2.11). Toutefois, la norme EN 15804 impose uniquement de déclarer la phase de production des produits (modules A1 à A3), la déclaration des autres phases du cycle de vie étant facultative.

De même, dans cette norme, l'unité fonctionnelle fournit une référence permettant de normaliser les résultats de l'ACV relatifs aux flux de matières. Cette norme introduit toutefois une autre unité : l'unité déclarée. L'unité déclarée peut être utilisée à la place de l'unité fonctionnelle lorsque la fonction exacte du produit au niveau du bâtiment n'est pas indiquée ou est inconnue.

2.5 Autres normes et réglementations (essentiellement pour la phase d'utilisation)

Comme indiqué précédemment, la norme EN15978 (2011) définit dans un système modulaire tous les impacts environnementaux potentiels de tous les aspects liés au bâtiment tout au long de son cycle de vie (Fig. 2.11). Dans ce système, le module B6 correspond à l'énergie consommée en phase opérationnelle (à savoir l'énergie utilisée par les systèmes techniques intégrés au bâtiment durant la phase d'exploitation). Il précise donc l'énergie consommée pour le refroidissement et pour le chauffage des locaux, l'alimentation en eau chaude sanitaire, le renouvellement de l'air, l'éclairage et l'énergie auxiliaire consommée pour les pompes, la régulation et l'automatisation. La norme EN15978 ne stipule toutefois pas de règles pour les calculs énergétiques. Elle indique néanmoins qu'ils

doivent être conformes à la Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (UE 2002) et ses transpositions nationales.

Cette directive est le principal instrument législatif au niveau européen pour assurer la performance énergétique des bâtiments. Les quatre axes majeurs de la directive que les États membres doivent mettre en œuvre sont les suivants (UE 2002) :

- ✓ Une méthodologie commune pour le calcul de la performance énergétique intégrée ;
- ✓ Des normes minimales relatives à la performance énergétique de bâtiments neufs et à certains bâtiments existants lors de leur rénovation ;
- ✓ Des systèmes de certification pour les bâtiments neufs et existants et l'affichage dans les bâtiments publics des certificats de performance énergétique et d'autres données pertinentes ;
- ✓ Le contrôle régulier des chaudières et des systèmes centraux de climatisation dans les bâtiments ainsi que l'évaluation d'une installation de chauffage lorsqu'elle comporte des chaudières de plus de 15 ans.

Après une refonte en 2010, la Directive Européenne sur le Performance énergétique des Bâtiments (EPBD) définit un cadre juridique pour l'actualisation des codes de construction nationaux et présente une politique visant des bâtiments à consommation énergétique quasi nulle afin que d'ici à 2020, la consommation énergétique de la totalité des bâtiments neufs soit quasi nulle (les principales caractéristiques des bâtiments « zéro carbone » sont illustrées à la Fig. 2.13).

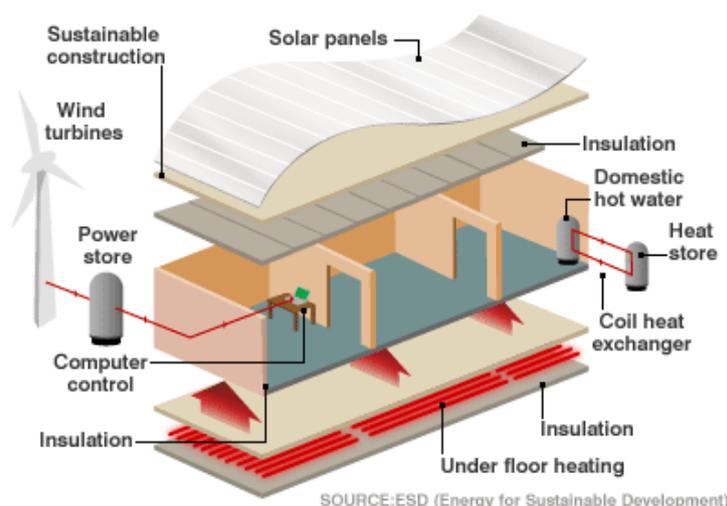


Fig. 2.13: Principales caractéristiques d'une maison zéro carbone

En dépit de ses dispositions générales, la EPBD ne fournit pas la méthode de calcul et chaque État membre au sein de la CE est libre de choisir sa mise en

œuvre. La plupart des pays affirment qu'ils appliquent des normes CEN ou d'autres normes internationales dans une certaine mesure. À cet égard, le présent document prend en compte deux autres normes :

- i) La norme ISO 13790 (2008) qui traite de tous les aspects des composants thermiques intervenant dans les calculs thermiques et définit les facteurs de corrélation permettant de tenir compte des effets thermiques dynamiques dans les calculs.
- ii) La norme EN 15316-3-1 (2007) qui traite des besoins énergétiques pour la production d'eau chaude sanitaire.

3 MÉTHODOLOGIES SIMPLIFIÉES POUR L'ÉVALUATION DES BÂTIMENTS

3.1

Introduction

Le secteur de la construction est soumis à des pressions croissantes en matière de durabilité : déclarations environnementales relatives aux produits, bâtiments à faible consommation énergétique, etc. Toutefois, les parties prenantes n'ont pas toujours la formation adéquate pour être capables d'analyser les performances environnementales des produits de construction.

Les performances thermiques des nouveaux bâtiments sont régies par des réglementations depuis plusieurs années, contraignant les architectes à avoir une bonne maîtrise et une bonne connaissance de la phase d'utilisation des bâtiments. D'un autre côté, bien qu'elles soient moins connues, l'énergie grise et l'empreinte carbone des matériaux sont progressivement intégrées dans les appels d'offres. Rares sont les acteurs du secteur qui ont l'expertise nécessaire pour traiter ces deux problématiques.

Dès lors, afin d'encourager la mise en œuvre de l'analyse du cycle de vie dans le secteur de la construction, ce chapitre introduit deux méthodes simplifiées :

- (i) une méthode pour une approche simplifiée du cycle de vie basée sur les macro-composants ;
- (ii) une méthode pour le calcul des besoins énergétiques d'un bâtiment pour le chauffage et le refroidissement des locaux, et notamment pour la production d'eau chaude sanitaire.

Les deux méthodes ont été élaborées dans le cadre du projet de recherche européen *SB_Steel* (2014). Elles reposent sur les principes des normes européennes récentes EN 15978 et EN 15804.

La méthode d'analyse du cycle de vie est décrite dans un premier temps ; vient ensuite la description de la méthode simplifiée pour le calcul des besoins énergétiques et la procédure d'étalonnage respective.

3.2 Algorithme pour l'analyse du cycle de vie basé sur les macro-composants

L'enveloppe interne et externe du bâtiment est un facteur crucial du comportement du bâtiment au niveau de sa consommation énergétique ou de ses charges environnementales. Ce constat a incité à créer des macro-composants, à savoir des solutions pré-assemblées pour les principaux composants du bâtiment. Les macro-composants sont donc des assemblages pré-définis de différents matériaux qui constituent le même composant d'un bâtiment (Gervásio et al., 2014).

Différentes solutions ont été pré-assemblées pour chaque composant du bâtiment. Le modèle utilisé pour l'analyse du cycle de vie du bâtiment, basé sur les macro-composants, est détaillé dans les paragraphes qui suivent.

3.2.1 Étapes générales

3.2.1.1 Objectif et champ d'application

Cet outil a pour objectif de quantifier les impacts environnementaux d'un bâtiment simple ou de composants du bâtiment (en m²) en utilisant les macro-composants définis au préalable. Cette approche permet donc de réaliser l'évaluation à deux niveaux différents : i) au niveau du composant ; et ii) du bâtiment.

3.2.1.1.1 Unité fonctionnelle

Au niveau du bâtiment, l'unité fonctionnelle est un bâtiment présentant une typologie spécifique (résidentiel, bureaux, etc.) conçu pour une durée de vie prédéfinie (par ex. 50 ans) en satisfaisant toutes les exigences type.

Au niveau d'un composant du bâtiment, l'unité fonctionnelle (en m²) est un composant d'un bâtiment présentant une typologie spécifique (mur externe, dalle intérieure, etc.) utilisé pendant sa durée de vie spécifique (50 ans par exemple). Dans ce cas, la fonction du composant du bâtiment peut être précisée ou non (en cas d'affirmations comparatives, la fonction du composant du bâtiment doit être indiquée).

3.2.1.1.2 Frontières du système

L'analyse environnementale du cycle de vie comprend la phase de la production des matériaux (modules A1 à A3), la phase de construction (module A4), la phase d'utilisation (module B1 à B5), la phase de la fin de vie (modules C1 à C4) ainsi que les bénéfices et les charges des processus de recyclage (module D), repris au Tableau 3.1.

Le Module B6 n'est pas pris en compte dans cette approche. Toutefois, la méthodologie présentée dans la prochaine section traite des aspects repris dans ce module.

Les modules A5, B1 et B7 sont également ignorés. Il s'est avéré que l'importance des impacts du processus de construction (module A5) (notamment l'utilisation des équipements, l'exploitation du chantier et la production de déchets) n'a pas été prise en compte au niveau du bâtiment (Gervásio et al., 2014).

Le Module B1 traite des émissions résultant de l'utilisation des produits installés dans le bâtiment qui ne sont pas examinés dans les autres modules de la phase d'utilisation.

Tableau 3.1: Modules d'informations du cycle de vie du bâtiment (selon la norme EN 15643-2:2011)

Produit phase		Phase de construct.		Phase d'utilisation								Phase de fin de vie					
Fourniture des matières premières		Transport	Fabrication	Transport	Processus de construction	Utilisation	Maintenance/entretien	Réparation	Remplacement	Réhabilitation	Consommation d'énergie en phase opérationnelle	Eau consommée en phase opérationnelle	Déconstruction/démolition	Transport	Traitement des déchets	Élimination	Potentiel de recyclage/réutilisation
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
x	x	x	x	-	-	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	

Ce module revêt peu d'importance compte tenu des matériaux à faibles émissions qui résultent d'une législation rigoureuse sur les matériaux. Enfin, la quantification de la consommation d'eau (module B7) n'est pas prise en compte car elle ne dépend pas des options de construction.

3.2.1.2 Inventaire du cycle de vie

Comme indiqué précédemment, la vérification de la qualité des données compte parmi les exigences des normes qui régissent l'ACV. Des lors, en ce qui concerne

les produits de construction, les données doivent être vérifiées en fonction des paramètres suivants (norme EN 15804) :

- Couverture temporelle : les ensembles de données doivent au minimum avoir été mis à jour au cours des dix dernières années pour les données génériques et au cours des cinq dernières années pour les données spécifiques du fabricant ;
- Les ensembles de données doivent être fondés sur des données moyennées sur un an ;
- Couverture géographique : les ensembles de données doivent refléter la zone géographique pour le produit déclaré ou le groupe de produits ;
- Couverture technologique : les ensembles de données doivent refléter la zone géographique pour le produit déclaré ou le groupe de produits ;
- Complétude : Les ensembles de données doivent être complets, conformément aux frontières du système, dans les limites fixées par les critères d'exclusion d'intrants et d'extrants.

La plupart des ensembles de données environnementales sont extraits de la base de données (2006) de PE International, à l'exception des données concernant l'acier. De plus, les ensembles de données relatives à l'acier sont fournis par la Worldsteel Association (2002) en collaboration avec PE International. La méthodologie est donc très similaire. Cela garantit une bonne cohérence pour la collecte et la gestion des données, de même qu'au niveau de la méthodologie relative aux règles d'affectation et de coupure, telles que présentées au Tableau 3.2, pour les principaux matériaux utilisés dans les macro-composants.

Tableau 3.2: Contrôle qualité des principaux matériaux des macro-composants

3.2.1.3	Couverture temporelle	Couverture géographique	Couverture technologique	Complétude
Profilé	2007, moyenne annuelle	Europe	Producteurs européens	>99% de la consommation d'énergie et de la masse
Barre d'armature en acier	2007, moyenne annuelle	Monde	Producteurs mondiaux	>99% de la consommation d'énergie et de la masse
Bobine d'acier	2007, moyenne annuelle	Europe	Producteurs européens	>99% de la consommation d'énergie et de la masse
Béton C20/25	2011, moyenne annuelle	Allemagne	Producteurs allemands	>95% de la consommation d'énergie et de la masse
Panneau à particules orientées(OSB)	2008, moyenne annuelle	Allemagne	Producteurs allemands	>99% de la consommation d'énergie et de la masse
Plaque de plâtre	2008, moyenne annuelle	Europe	Producteurs européens	>95% de la consommation d'énergie et de la masse
Briques	2011, moyenne annuelle	Allemagne	Producteurs allemands	>95% de la consommation d'énergie et de la masse

Laine de roche	2011, moyenne annuelle	Europe	Producteurs européens	>95% de la consommation d'énergie et de la masse
Polystyrène expansé (EPS)	2011, pas de données	Europe	Pas de données	Pas de données
Polystyrène extrudé (XPS)	2011, moyenne annuelle	Allemagne	Producteurs allemands	>95% de la consommation d'énergie et de la masse
Mousse de polyuréthane rigide (PUR)	2011, moyenne annuelle	Allemagne	Producteurs allemands	>95% de la consommation d'énergie et de la masse
Liège expansé	2011, moyenne annuelle	Allemagne	Producteurs allemands	>95% de la consommation d'énergie et de la masse
Laine de verre	2011, moyenne annuelle	Europe	Producteurs européens	>95% de la consommation d'énergie et de la masse
Mousse de polyéthylène (PE)	2011, moyenne annuelle	Allemagne	Producteurs allemands	>95% de la consommation d'énergie et de la masse

3.2.1.4 Évaluation de l'impact du cycle de vie

Les catégories environnementales sélectionnées pour décrire les impacts environnementaux du bâtiment sont détaillées au Tableau 2.10 et correspondent à celles recommandées par les normes européennes relatives à l'évaluation de la performance environnementale des bâtiments (EN 15643-2 et EN 15978).

Le concept modulaire des normes susmentionnées a été intégré dans l'approche. Le résultat de l'analyse environnementale du cycle de vie de chaque macro-composant est donc indiqué par module ou en fonction de la valeur cumulée de chacune des phases.

L'analyse du cycle de vie de chaque macro-composant a été réalisée à l'aide du logiciel GaBi (2012).

3.2.2 Affectation du recyclage des matériaux

L'acier est totalement recyclable et la ferraille peut fournir la même qualité d'acier en fonction de la technique de métallurgie et de recyclage (Worldsteel Association, 2009). Une structure en acier en fin de vie sera dès lors plus que probablement démantelée et l'acier envoyé pour recyclage ou réutilisation (partielle ou complète). Les données du Steel Recycling Institute (2009) indiquent un taux de recyclage de l'acier de construction en Amérique du Nord d'environ 97,5%. Les graphiques proposés à la Fig. 3.1, font ressortir la tendance caractérisant respectivement l'évolution des taux de recyclage de l'acier de construction et celle de l'acier d'armature dans le secteur de la construction.

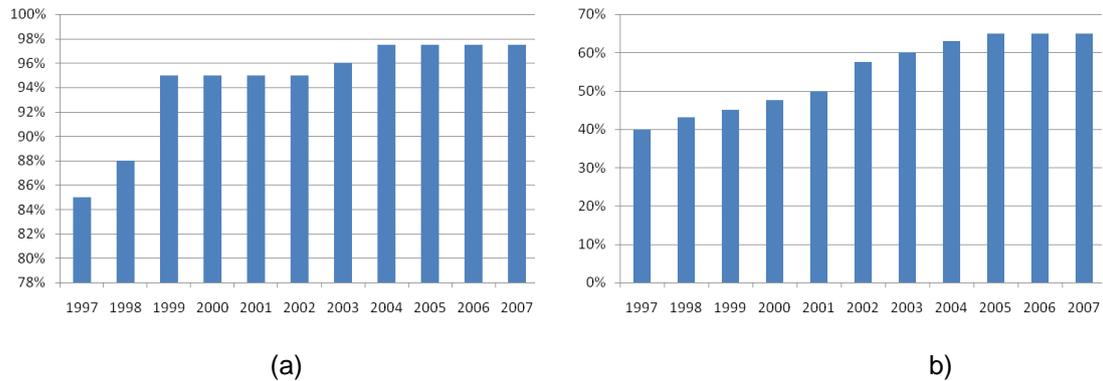


Fig. 3.1: Taux de recyclage de a) l'acier de construction et b) l'acier d'armature (Steel Recycling Institute, 2009)

La réutilisation et le recyclage de l'acier est une problématique ayant un caractère multifonctionnel exigeant le recours à un processus d'affectation, tel que décrit dans les paragraphes qui suivent.

3.2.2.1 Introduction

La plupart des processus industriels sont multifonctionnels : leurs extrants impliquent plusieurs produits et les intrants utilisés pour la fabrication des produits nécessitent souvent des produits intermédiaires ou rejetés. Un problème d'affectation survient lorsqu'il convient de prendre la bonne décision pour affecter les flux entrants/sortants à l'unité fonctionnelle fournie par le système de produits à l'étude.

La norme ISO 14040 (2006) définit l'affectation comme « l'imputation des flux entrant ou sortant d'un processus ou d'un système de produits entre le système de produits étudié et un ou plusieurs autres systèmes de produits ». Un processus d'affectation consiste donc à répartir les flux entre les processus élémentaires ou les systèmes de produits.

Selon la norme 14044 (2006), l'affectation doit être évitée soit en divisant le processus élémentaire à affecter en deux sous-processus ou plus et en recueillant les données d'intrant et d'extrant rattachées à ces sous-processus soit en étendant le système de produits pour y inclure les fonctions supplémentaires des coproduits, (expansion du système).

L'expansion du système passe par l'approche de la charge évitée, laquelle exclut les fonctions excédentaires du processus multifonctionnel en soustrayant les processus monofonctionnels équivalents afin d'obtenir un processus monofonctionnel.

Lorsque la répartition des processus ou l'expansion du système ne sont pas réalisables compte tenu du domaine d'application et de l'objet de l'étude,

l'affectation est alors inévitable. Dans ce cas, la norme ISO 14044 (2006) recommande deux alternatives : 1) la répartition des intrants et les extrants du système en fonction des relations physiques sous-jacentes (voire chimiques ou biologiques); ou ii) l'affectation est basée sur d'autres relations (par ex. la valeur économique des produits).

La question de la réutilisation et du recyclage de matériaux a trait à plusieurs fonctions impliquant le recours aux processus d'affectation. Les principes et procédures de l'affectation susmentionnés sont également valables pour les cas de recyclage et de réutilisation, bien que dans ce cas, les modifications des propriétés inhérentes des matériaux doivent être prises en compte lors du choix de la procédure d'affectation à appliquer (ISO 14044, 2006).

Trois situations peuvent se présenter dans ce cas (Werner, 2005) :

- i) Les propriétés inhérentes du matériau ne sont pas modifiées dans le cadre du système de produits considéré et le matériau va être réutilisé pour la même application ;
- ii) les propriétés inhérentes du matériau sont modifiées dans le cadre du système de produits et le matériau va être réutilisé pour la même application ;
- iii) les propriétés inhérentes du matériau sont modifiées dans le cadre du système de produits considéré et le matériau va être utilisé dans d'autres applications.

Le premier cas est une situation en circuit fermé dans laquelle le remplacement des matières primaires est considéré comme étant total ; dès lors, aucune charge environnementale résultant de la production ou de l'élimination finale de matériaux primaires n'est affectée au système de produits. Le deuxième cas correspond à une situation en circuit ouvert supposant une situation en circuit fermé. Dans ce cas, la modification des propriétés des matériaux n'est pas jugée pertinente et le recyclage est considéré comme une situation en circuit fermé. Le dernier cas correspond à un système de produits en circuit ouvert pour lequel le remplacement des matières premières est supposé partiel. Dans ce cas, les charges environnementales résultant de la production de matières premières ou de l'élimination finale doivent être partiellement affectées au système à l'étude.

Selon la norme ISO 14044 (2006), dans le cas d'un système de produits en circuit fermé, le recours à l'affectation est évité dans la mesure où l'utilisation de matières secondaires remplace l'utilisation de matières vierges.

3.2.2.2 Éviter l'affectation de la ferraille

Au cours de son cycle de vie, les phases de fabrication, de traitement final et de la de fin de vie de l'acier créent de la ferraille (voir la Fig. 3.2). Il est donc nécessaire

d'envisager une procédure d'affectation pour les extrants de ferraille générés par le système tout au long de sa durée de vie. Par ailleurs, comme décrit plus loin dans ce texte, l'acier fait l'objet de divers procédés de production et l'affectation des intrants de ferraille à la fabrication de l'acier est une autre donnée à considérer.

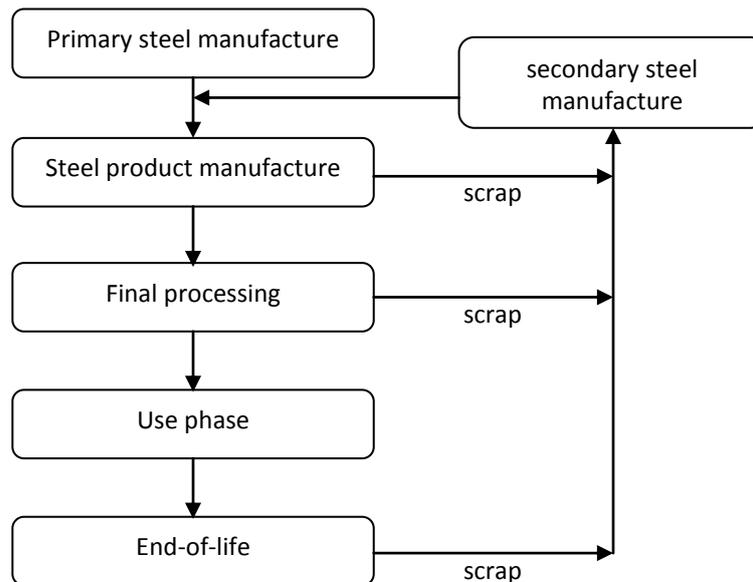


Fig. 3.2: Frontière du système de l'ICV incluant les données de fin de vie relatives à la ferraille (ICL, 2002)

Enfin, l'acier peut être recyclé ou réutilisé de nombreuses fois et une méthode d'affectation adéquate est nécessaire pour le recyclage et la réutilisation multiples des composants en acier.

La règle d'affectation en circuit fermé pour le recyclage des matériaux élaborée par la Worldsteel Association (LCI, 2002) est donc la méthodologie adoptée pour appréhender le problème de l'affectation de l'acier. Cette méthodologie a été élaborée afin de générer les données de l'ICV des produits en acier, en vue du recyclage en fin de vie. L'adoption d'une règle d'affectation en circuit fermé se justifie par le fait que la ferraille est refondue pour produire un nouvel acier sans aucune modification ou presque des propriétés inhérentes. Dans ce cas, conformément aux lignes directrices de la norme ISO 14044, le recours à l'affectation est évité dans la mesure où l'utilisation de matières secondaires remplace l'utilisation de matières vierges (primaires).

L'acier peut être produit par le biais de deux procédés : le haut-fourneau (HF) et le four à arc électrique (FEA). La principale différence entre les deux procédés ? L'utilisation de ferraille dans le processus d'aciérie : le procédé HF consiste à

produire l'acier quasi exclusivement à partir de matières premières alors que dans le cas du FEA, la production d'acier recourt essentiellement à de la ferraille.

Dès lors, si l'on considère les deux principaux procédés de traitement de l'acier et en supposant les données de l'ICV pour la production d'acier via le HF (en supposant l'utilisation de 100% de matières premières) fournies par X_{pr} et les données de l'ICV pour la production d'acier via le FEA (en supposant 100% d'acier secondaire) fournies par X_{re} , les données de l'ICV associées à la ferraille sont données par l'expression (3.1)

$$LCI_{scrap} = Y(X_{pr} - X_{re})$$

Éq. (3.1)

où Y est le rendement métallique, représentant le rendement du processus secondaire de conversion de la ferraille en acier. Selon la Worldsteel association (LCI, 2002), il faut près de 1,05 kg de ferraille pour produire 1 kg d'acier secondaire.

S'agissant du procédé HF, en supposant un apport de 100% de matières premières et un taux de récupération (fraction de l'acier récupéré sous forme de ferraille tout au long du cycle de vie d'un produit en acier) de RR (Recycling Rate), la quantité nette de ferraille produite à la fin du cycle de vie est alors donnée par RR . Dès lors, l'ICV pour 1 kg d'acier, en incluant la fin de vie, est donné par l'ICV de la fabrication primaire avec un crédit pour la ferraille produite, tel que déterminé par l'expression (3.2).

$$LCI = X_{pr} - RR[Y(X_{pr} - X_{re})]$$

Éq. (3.2)

D'autre part, en supposant la consommation d'1 kg d'acier secondaire pour produire de l'acier via le FEA, et, en fin de vie, la récupération de RR kg d'acier pour le recyclage, la quantité nette de ferrailles consommée est donnée par $(1/Y - RR)$. Dans ce cas, l'ICV pour 1 kg d'acier, en tenant compte de la fin de vie, est obtenu par l'ICV de la fabrication secondaire avec un débit pour la ferraille consommée, tel que déterminé par l'équation (3.3) :

$$LCI = X_{re} + (1/Y - RR)[Y(X_{pr} - X_{re})]$$

Éq. (3.3)

La reformulation de l'expression (3.3) permet d'obtenir l'expression (3.2), indiquant que l'ICV du système ne dépend pas de la source du matériau. Il dépend du ratio de recyclage de l'acier en fin de vie et du rendement associé au procédé de

recyclage. En conséquence, l'expression (3.3) permet d'affecter les déchets d'acier indépendamment du procédé de production de l'acier.

Les expressions précédentes ont été dérivées en supposant une production primaire ou secondaire à 100%. En réalité, les produits en acier fabriqués en recourant au procédé primaire peuvent consommer une certaine quantité de ferrailles et les produits issus du four à arc électrique (FEA) peuvent comporter un faible pourcentage de matières premières. Dans ce cas, le débit ou crédit déterminé par l'expression (3.1) peut être réécrit comme suit :

$$LCI_{scrap} = (RR - S) \times Y (X_{pr} - X_{re})$$

Éq. (3.4)

où $(RR - S)$ représente la quantité nette de ferrailles à l'étape de fin de vie. Compte tenu des données de l'ICV d'un produit fini en acier fournies par X' , l'ICV pour le produit, incluant le recyclage en fin de vie, est déterminé par l'expression suivante :

$$LCI = X' - [(RR - S) \times Y (X_{pr} - X_{re})]$$

Éq. (3.5)

L'expression (3.5) est adoptée dans les méthodologies d'ACV présentées dans le chapitre suivant afin de produire les données de l'ICV des produits en acier, et notamment du recyclage en fin de vie.

3.2.3 Caractérisation des macro-composants

Des macro-composants ont été définis pour différents éléments de construction selon le système de classification UniFormat (2010). Les catégories suivantes sont examinées : A) Structure, B) Enveloppe et C) Parachèvement. Chaque catégorie principale est subdivisée. Le classement détaillé est proposé au Tableau 3.3.

Tableau 3.3: Classement des éléments de construction (UnifFormat, 2010)

(A) Structure	(A40) Dalles sur sol	(A4010) Dalles sur sol standards	
(B) Enveloppe	(B10) Structure	(B1010) Plancher	(B1010.10) Ossature de plancher
			(B1010.20) Tabliers de plancher, dalles et chapes
		(B1020) Toiture	(B1020.10) Charpente
		(B1020.20) Tabliers de toit, dalles et coffrage	
	(B20) Eléments verticaux extérieurs	(B2010) Murs extérieurs	(B2010.10) Parement de mur ext.

			(B2010.20) Construction de mur ext.
		(B2020) Fenêtres extérieures	
		(B2050) Portes extérieures	
	(B30) Eléments horizontaux extérieurs	(B3010) Couverture	
		(B3060) Ouvertures horizontales	
(C) Aménagement intérieur	(C10) Eléments intérieurs	(C1010) Cloisons	
	(C20) Finitions intérieures	(C2010) Finitions de mur	
		(C2030) Revêtements de sol	
		(C2050) Finitions de plafond	

Au sein de chaque élément de construction (voir Tableau 3.3), les macro-composants correspondants ont la même fonction et des propriétés similaires. L'unité fonctionnelle de chaque macro-composant correspond à 1 m² d'un élément de construction aux caractéristiques similaires, afin d'atteindre une durée de vie de 50 ans.

Cette approche a été élaborée pour évaluer un bâtiment à un stade précoce de la conception (Gervásio et al., 2014). Par conséquent, afin de pallier le manque de données aux premiers stades de la conception, la structure porteuse (pour une structure en acier laminé à chaud, une structure en acier léger ou une structure en béton) est affectée aux macro-composants liés à la catégorie Ossature de plancher (B1010.10) ou Charpente (B1020.10), par m².

Les informations fournies par chaque macro-composant sont illustrées par l'exemple repris au Tableau 3.4. Outre les caractéristiques des différentes couches de matériaux, le coefficient de transmission thermique (U) (tenant compte des ponts thermiques le cas échéant) et l'inertie thermique (κ_m) sont également indiqués pour permettre de quantifier l'énergie opérationnelle du bâtiment.

Les macro-composants ont été compilés dans une base de données, proposée à l'Annexe 1 du présent document.

3.2.4 Exemple illustratif d'un assemblage de macro-composants

Dans certains cas, pour respecter la fonction d'un élément de construction, différents macro-composants doivent être envisagés simultanément. Un exemple illustratif est ici proposé pour une dalle d'intérieure d'un bâtiment résidentiel.

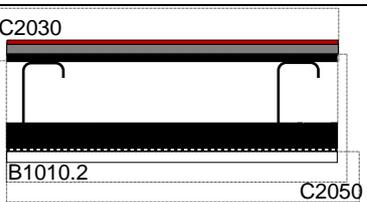
3.2.4.1 Assemblage de macro-composants

Les macro-composants ci-après sont choisis pour une dalle intérieure d'un bâtiment :

- (i) un macro-composant pour le revêtement de sol (C2030) ;
- (ii) un macro-composant pour un système structurel de plancher (B1010.10) ;
- (iii) un macro-composant pour les finitions de plafond.

L'assemblage de macro-composants sélectionné est détaillé dans le Tableau 3.4. Dans ce cas, la valeur de la transmission thermique (U) n'est pas indiquée étant donné que le macro-composant correspond à une dalle intérieure et qu'il n'a donc aucune incidence sur le calcul des besoins énergétiques.

Tableau 3.4: Assemblage de macro-composants pour une dalle intérieure

Assemblage de macro-composants	Macro-composants	Matériau	Épaisseur (mm)/ Densité (kg/m ²)	Valeur U (W/m ² .K)	κ_m (J/m ² .K)
	C2030 Revêtements de sol	Carreaux de céramique	31 kg/m ²	-	61062
		Revêtement de béton	13 mm		
	B1010.10 Système structurel de plancher	OSB	18 mm		
		Cavité d'air	160 mm		
		Laine de roche	40 mm		
		Acier léger	14 kg/m ²		
	C2050 Finitions de plafond	Panneau de gypse	15 mm		
Peintures		0,125 kg/m ²			

3.2.4.2 Unité fonctionnelle et durée de vie estimée des matériaux

L'unité fonctionnelle de l'élément de construction est une dalle intérieure (par m²) d'un bâtiment résidentiel avec une durée de vie exigée de 50 ans. Les macro-composants sélectionnés doivent satisfaire à la même unité fonctionnelle que celle de l'élément de construction. La durée de vie estimée des différents matériaux doit

donc être prise en compte. Le Tableau 3.5 indique la durée de vie estimée des matériaux.

Tableau 3.5: Durée de vie estimée des matériaux

Macro-composant	Matériau	Unité	Durée de vie estimée [années]
Revêtements de sol	Carreaux de céramique	m ²	25
	Revêtement de béton	m ²	50
Système structurel de plancher	Acier formé à froid	kg/m ²	50
Tablier de plancher	Laine de roche	m ²	50
	OSB	m ²	50
	Panneau de gypse	m ²	50
Finitions de plafond	Peinture	m ²	10

Dès lors, pour respecter l'unité fonctionnelle, certains matériaux doivent être remplacés ou réhabilités selon un scénario prédéfini.

3.2.4.3 Scénarios et hypothèses

Afin de disposer des informations environnementales pour tous les modules, il est nécessaire de formuler des scénarios et des hypothèses.

L'unité fonctionnelle correspond à une durée de vie de 50 ans. Cela signifie que chaque matériau du macro-composant doit satisfaire à cette exigence. Dès lors, les matériaux ayant une durée de vie prévue de moins de 50 ans doivent être entretenus voire même remplacés au cours de cette période. Différents scénarios sont donc envisagés pour chaque matériau afin de respecter la durée de l'analyse. De même, en phase de fin de vie, chaque matériau a une destination différente en fonction de ses caractéristiques intrinsèques. Dès lors, un scénario de fin de vie est envisagé pour chaque matériau en fonction des propriétés de ce dernier.

Tous les scénarios susmentionnés sont définis conformément aux règles stipulées dans les normes EN 15643-2 et EN 15978.

3.2.4.3.1 Scénarios pour le transport de matériaux (Modules A4 et C2)

Il est supposé que les distances de transport entre les usines de production et le chantier (module A4) et les distances entre le site de démolition et les sites de recyclage/décharge (module C2) sont de 20 km et que le transport se fait par camion avec une charge utile de 22 tonnes. Le concepteur peut néanmoins stipuler d'autres distances, ce qui permet d'analyser la sensibilité en fonction du transport des différents matériaux.

3.2.4.3.2 Scénarios pour la phase d'utilisation (Modules B1:B7)

Des scénarios sont prédéfinis pour les différents matériaux de manière à atteindre la durée de vie requise de 50 ans. Les scénarios suivants sont donc définis pour l'assemblage des macro-composants susmentionné :

- remplacement des carreaux en céramiques tous les 25 ans ;
- peinture du plafond tous les 10 ans.

3.2.4.3.3 Scénarios pour la fin de vie (Modules C1 à C4) et le recyclage (Module D)

Divers scénarios de fin de vie sont précisés pour les matériaux en fonction de leurs propriétés inhérentes, comme indiqué au Tableau 3.6. L'OSB est donc considéré comme étant incinéré (à 80%) dans une centrale électrique à biomasse et des crédits sont attribués pour la récupération d'énergie. L'acier est recyclé, en supposant un taux de recyclage de 90% et des crédits sont obtenus en raison de la quantité nette de ferrailles à la fin du cycle de vie. Il est considéré de la même manière que la laine de roche est recyclée (à 80%). Toutefois, compte tenu du manque de données concernant le processus de recyclage, aucun crédit n'est accordé si ce n'est pour la diminution des déchets mis en décharge.

Tableau 3.6: Options de fin de vie des matériaux

Matériau	Scénario d'élimination/recyclage	Crédits
Carreaux de céramique	Décharge (100%)	-
Revêtement de béton	Décharge (100%)	-
Plaques de plâtre	Décharge (100%)	-
Laine de roche	Recyclage (80%) + décharge (20%)	-
OSB	Incinération (80%) + Décharge (20%)	Crédit pour la récupération d'énergie
Acier léger	Recyclage (90%) + décharge (10%)	Crédit accordé pour la quantité nette de ferraille

Il a été envisagé d'envoyer tous les matériaux restants dans une décharge de matériaux inertes.

3.2.4.4 Analyse environnementale

Les résultats des assemblages de macro-composants repris au Tableau 3.4 figurent au Tableau 3.7, par m².

Tableau 3.7: Analyse environnementale du cycle de vie des macro-composants (par m²)

Catégorie d'impact	A1-A3	A4	B4	C2	C4	D	TOTAL
ADP-élément. [kg d'éq. Sb]	1.86E-03	6.59E-09	1.83E-03	5.76E-09	5.93E-07	-1.96E-04	3.49E-03

ADP-comb. foss. [MJ]	1.31E+03	2.45E+00	8.12E+02	2.14E+00	2.31E+01	-	1.82E+03
PA [kg d'éq. SO ₂]	2.47E-01	7.91E-04	9.14E-02	6.85E-04	1.01E-02	-4.45E-02	3.05E-01
PE [kg d'éq. PO ₄]	2.61E-02	1.82E-04	1.40E-02	1.57E-04	1.54E-03	-1.01E-03	4.09E-02
GWP [kg d'éq. CO ₂]	8.38E+01	1.77E-01	6.48E+01	1.54E-01	6.80E+00	-	1.41E+02
PDO [kg d'éq. R11]	2.80E-06	3.09E-12	2.04E-06	2.70E-12	1.27E-09	1.76E-07	5.01E-06
POCP [kg d'éq. éthène]	3.41E-02	-2.58E-04	1.43E-02	-2.23E-04	2.62E-03	-1.07E-02	3.98E-02

L'analyse de la contribution de chaque module est illustrée à la Fig. 3.3. Les Modules A1-A3 contribuent le plus à l'ensemble des catégories d'impact (plus de 50% pour la plupart des catégories environnementales). Le Module B4, dont la contribution varie de 10 à 20%, vient ensuite. Le Module D contribue dans une large mesure (près de 10%) à la plupart des catégories d'impact. La contribution du Module C4 est moindre (près de 5% dans certains cas). Les modules restants, dont la contribution est négligeable, viennent ensuite.

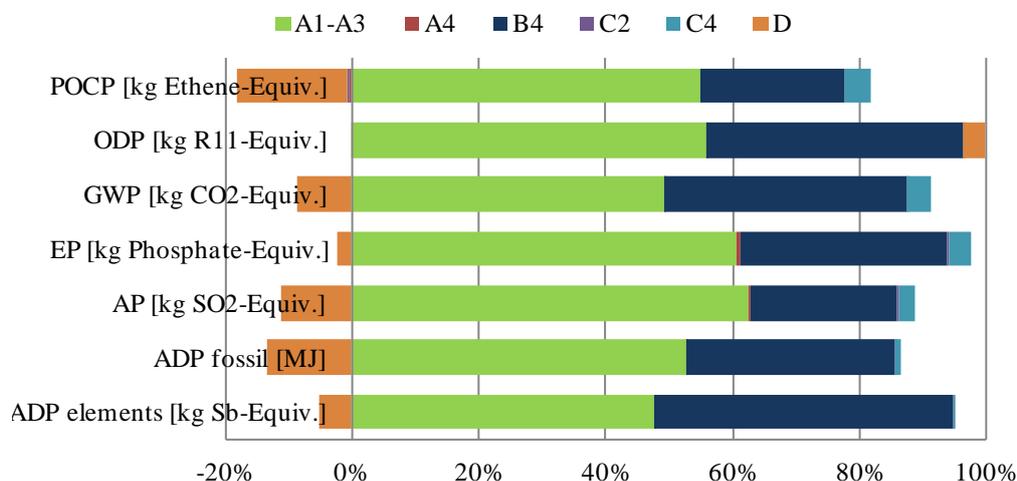


Fig. 3.4: Impacts environnementaux sur le cycle de vie d'un macro-composant (par m²)

Tous les macro-composants ont été calculés de la même manière. Comme précisé précédemment, ces macro-composants permettent une analyse du cycle de vie au niveau de l'élément ou du bâtiment.

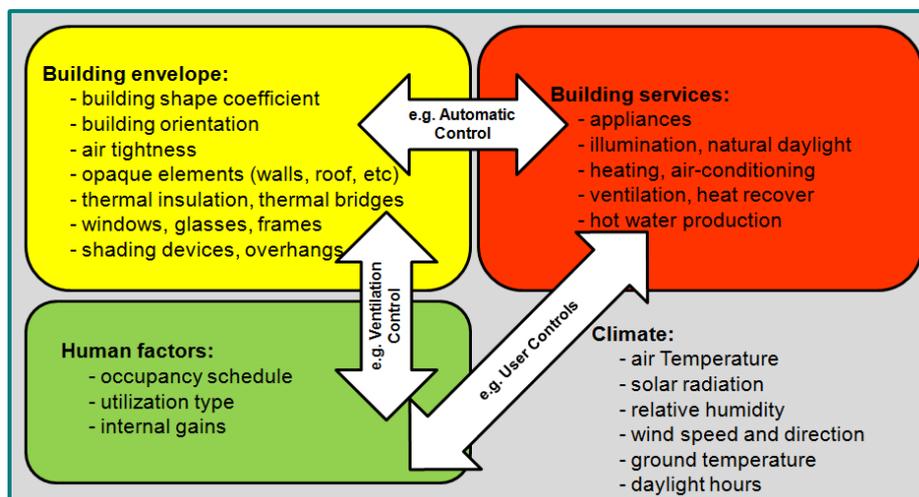


Fig. 3.5: Principaux facteurs clés conditionnant la consommation énergétique des bâtiments (Santos et al., 2012)

Les paramètres peuvent être regroupés en quatre ensembles : climat, enveloppe du bâtiment, techniques spéciales du bâtiment et facteurs humains, comme illustré à la Fig. 3.5. La plupart de ces facteurs, tels que décrits dans les paragraphes suivants, sont intégrés dans l'algorithme.

En termes de conditions climatiques, l'emplacement du bâtiment est crucial pour les calculs du comportement thermique (Santos et al., 2011, 2012). À cet égard, il convient de définir deux paramètres climatiques essentiels pour calculer le besoin énergétique :

- i) température de l'air ;
- ii) rayonnement solaire sur une surface selon une orientation donnée.

La Fig. 3.6 illustre graphiquement ces données mensuelles moyennes relatives à la ville de Timisoara en Roumanie.

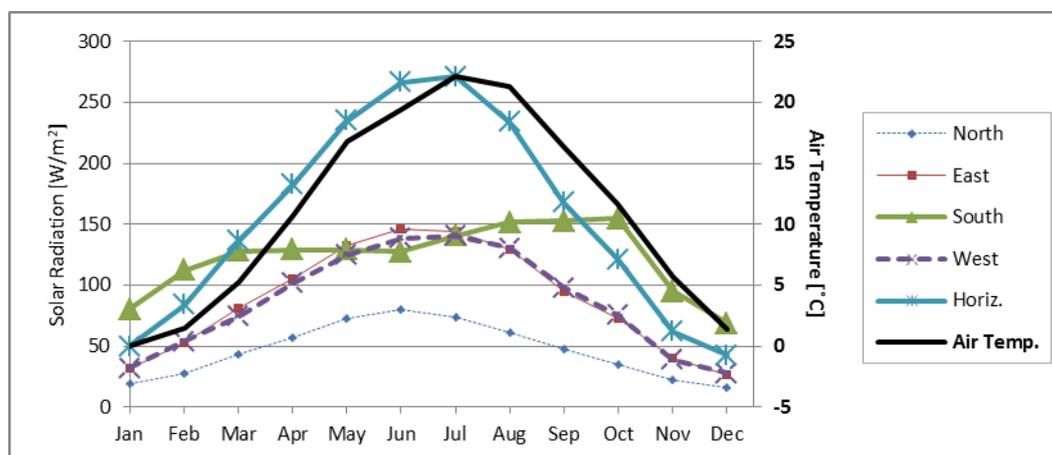


Fig. 3.6: Température de l'air extérieur moyenne mensuelle et rayonnement solaire incident: Timisoara (RO)

La méthodologie est actuellement calibrée pour cinq régions climatiques (classées sur la base de la classification climatique de fonction de Köppen-Geiger) : i) Csa; ii) Csb; iii) Cfb; iv) Dfb; v) Dfc. La classification climatique de Köppen-Geiger est l'un des systèmes de classification climatique les plus répandus (Kottek et al., 2006). La Fig. 3.7 présente la classification climatique de Köppen-Geiger pour l'Europe. L'incidence de la latitude, de l'altitude et du voisinage des côtes sur le climat de ces régions est clairement visible. Dans les régions aux latitudes inférieures (en dessous de 45°N) (Europe méridionale, à savoir les pays méditerranéens), le climat se voit attribuer la classification codifiée « Csa » et « Csb », soit « C - Climat tempéré chaud », « s - été sec » et « a - été chaud » ou « b - été tempéré ».

Au-dessus de ces latitudes (entre 45 à 55°N), dans les pays de l'ouest d'Europe centrale, le climat relève essentiellement de la catégorie « Cfb » (C - Climat tempéré chaud », « f - totalement humide » et « b - été tempéré ». Dans les pays de l'est de l'Europe centrale (éloigné de la côte atlantique), le climat est catégorisé comme « Dfb », soit « D – neige », « f - totalement humide » et « b - été tempéré ».

Dans les régions à des latitudes encore plus élevées (au-delà de 55°N), dans les pays nordiques européens, le climat est catégorisé la plupart du temps comme « Dfc »; soit « D – neige »; « f - totalement humide » et « c - été frais ». Il existe quelques similitudes entre ce climat et celui des pays de l'est de l'Europe centrale. La principale différence est à la saison estivale qui est la plus froide.

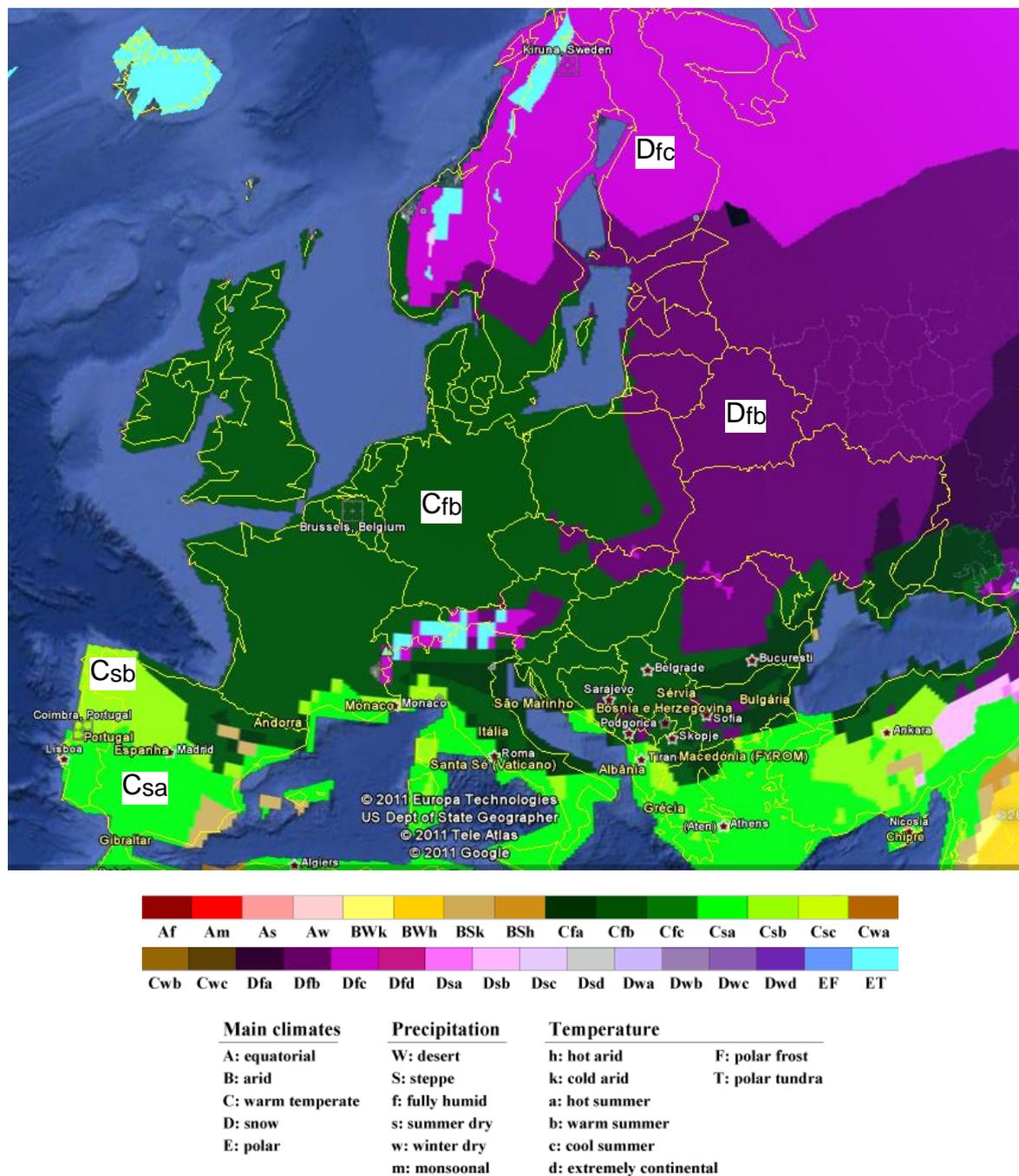


Fig. 3.7: Carte européenne de la classification climatique de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006; Google Earth, 2014).

Une base de données météorologiques de différents sites européens a été créée. Le Tableau 3.8 présente une liste de 48 villes pour lesquelles ces données ont déjà été recueillies. La majeure partie de ces données climatiques est issue de la base de données climatiques du logiciel de simulation énergétique EnergyPlus

(EERE-USDoE, 2014). Les données restantes ont été fournies par des partenaires du projet de recherche.

Tableau 3.8: Liste des lieux disposant de données météorologiques

Ville	Pays	Région climatique	Latitude
Amsterdam	Pays-Bas	Cfb	52
Ankara	Turquie	Csb	39
Arkhangelsk	Russie	Dfc	64
Athènes	Grèce	Csa	37
Barcelone	Espagne	Csa	41
Berlin	Allemagne	Cfb	52
Bilbao	Espagne	Cfb	43
Bratislava	Slovaquie	Cfb	48
Bruxelles	Belgique	Cfb	50
Bucarest	Roumanie	Cfa	44
Coimbra	Portugal	Csb	40
Gêne	Italie	Csb	44
Graz	Autriche	Dfb	47
Hambourg	Allemagne	Cfb	53
Helsinki	Finlande	Dfb	60
Istanbul	Turquie	Csa	40
Kiev	Ukraine	Dfb	50
Kiruna	Suède	Dfc	67
La Coruña	Espagne	Csb	43
Lisbonne	Portugal	Csa	38
Lubiana	Slovénie	Cfb	46
Londres	Angleterre	Cfb	50
Madrid	Espagne	Csa	40
Marseille	France	Csa	43
Milan	Italie	Cfb	45
Minsk	Biélorussie	Dfb	53
Montpellier	France	Csa	43
Moscou	Russie	Dfb	55
Munich	Allemagne	Cfb	48
Nantes	France	Cfb	47
Nice	France	Csb	43
Oslo	Norvège	Dfb	59
Ostersund	Suède	Dfc	63
Paris	France	Cfb	48
Porto	Portugal	Csb	41
Prague	République tchèque	Cfb	50

Rome	Italie	Csa	41
Salamanque	Espagne	Csb	40
San Remo	Italie	Csb	43
Séville	Espagne	Csa	37
Stockholm	Suède	Dfb	59
Tampere	Finlande	Dfc	61
Thessalonique	Grèce	Cfa	40
Timisoara	Roumanie	Cfb	45
Vienne	Autriche	Dfb	48
Vigo	Espagne	Csb	42
Varsovie	Pologne	Dfb	52
Zurich	Suisse	Cfb	47

3.3.3 Méthode de calcul des besoins énergétiques

La méthode adoptée permet de calculer les besoins énergétiques sur une base mensuelle pour le chauffage et le refroidissement des locaux de même que pour la production d'eau chaude sanitaire. Afin de déterminer la contribution de chaque grandeur des calculs thermiques, il est nécessaire de s'en remettre à plusieurs normes, comme indiqué à la Fig. 3.8, pour le refroidissement et le chauffage des locaux.

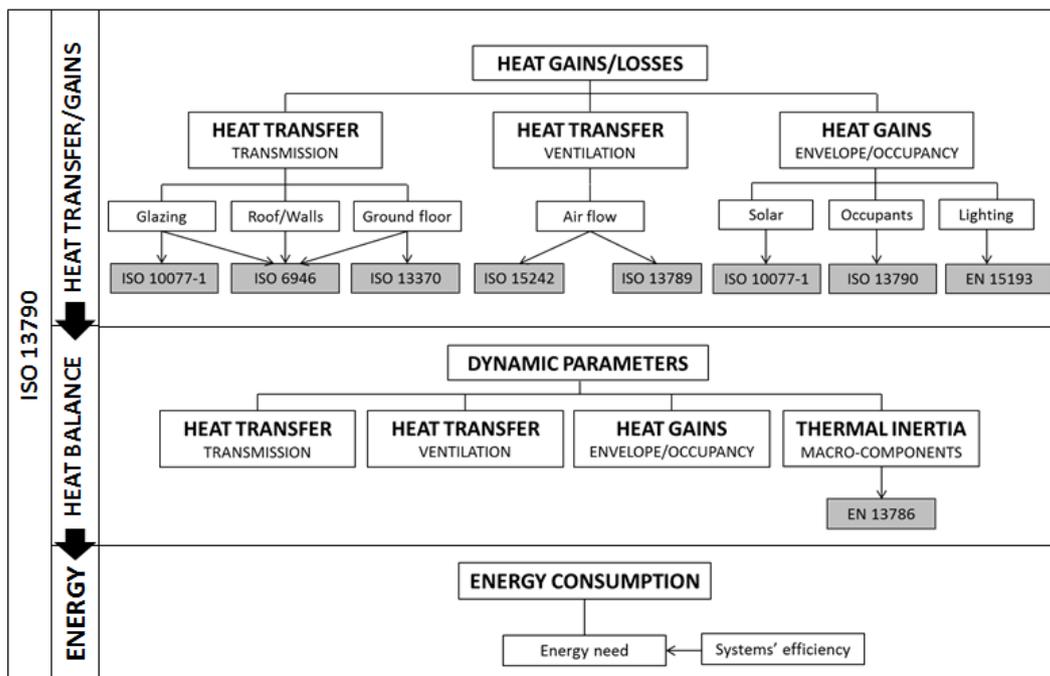


Fig. 3.8: Diagramme de l'algorithme et des normes de référence pour la climatisation des locaux

Comme l'indique la Fig. 3.8, la norme ISO 13790 (2008) est la principale norme utilisée et traite de calculs spécifiques liés à d'autres normes. Compte tenu de l'importance de la production d'eau chaude sanitaire au niveau de la consommation énergétique d'un bâtiment, essentiellement pour les bâtiments résidentiels, il est primordial d'estimer sa contribution. Comme mentionné précédemment, cette estimation est effectuée conformément aux lignes directrices de la norme EN 15316-3-1 (2007).

La procédure et l'architecture de l'algorithme utilisé pour calculer les besoins énergétiques sont détaillées à la Fig. 3.9.

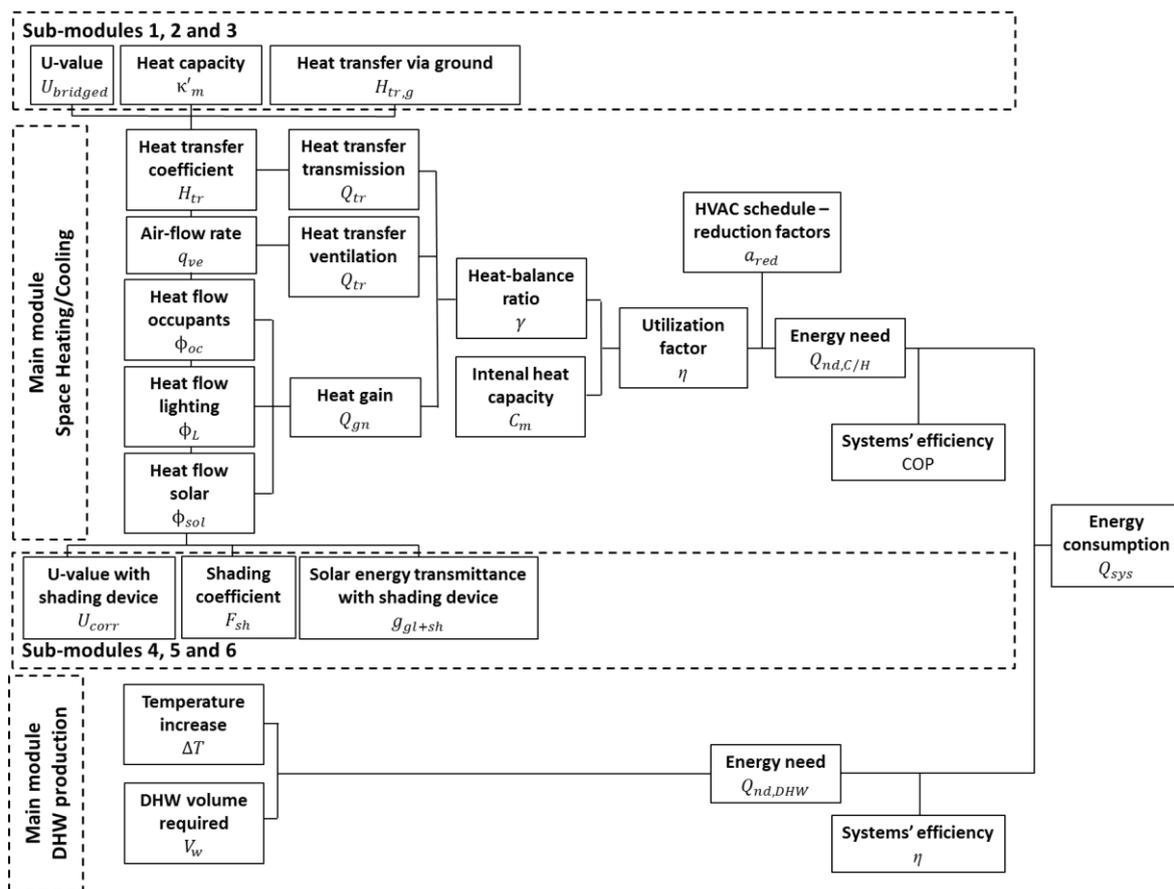


Fig. 3.9: Diagramme du calcul de la consommation énergétique du bâtiment.

Les sous-modules 1 et 2, correspondant respectivement à la valeur U et à la capacité thermique des éléments de l'enveloppe, ont été précédemment calculés pour les macro-composants sélectionnés par l'utilisateur. Le sous-module 3 traite de la transmission de chaleur au sol. Les sous-modules 4, 5 et 6 traitent des sous-routines utilisées pour calculer les effets des dispositifs d'ombrage et de l'ombrage dû à la forme du plan au sol. Toutefois, la version actuelle de l'AMECO tient uniquement compte de plans au sol rectangulaires.

3.3.3.1 Besoin énergétique pour le chauffage et le refroidissement des locaux

L'Éq. (3.6) et l'Éq. (3.7) sont les principales équations définies dans la norme ISO 13790 (2008) pour quantifier le besoin énergétique mensuel, (m), supposant un fonctionnement continu des systèmes, ($cont$), (voir norme ISO 13790 pour la nomenclature) :

$$Q_{H,nd,cont,m} = (Q_{H,tr,m} + Q_{H,ve,m}) - \eta_{H,gn,m} \cdot Q_{H,gn,m}$$

Éq. (3.6)

$$Q_{C,nd,cont,m} = Q_{C,gn,m} - \eta_{C,ls,m} \cdot (Q_{C,tr,m} + Q_{C,ve,m})$$

Éq. (3.7)

où

- $Q_{H,nd}$, besoin énergétique pour le chauffage (kWh) ;
- $Q_{C,nd}$, besoin énergétique pour le refroidissement (kWh) ;
- Q_{tr} , transfert thermique total par transmission (kWh) ;
- Q_{ve} , transfert thermique total par renouvellement d'air (kWh) ;
- $\eta_{H,gn}$, facteur d'utilisation des apports (-) ;
- $\eta_{C,ls}$, facteur d'utilisation des pertes (-).

La méthodologie de calcul de tous ces paramètres du besoin énergétique fait l'objet des rubriques suivantes.

3.3.3.1.1 TRANSFERT THERMIQUE PAR TRANSMISSION

Le bilan thermique du bâtiment tient compte de tous les types de transfert thermique par transmission :

- (i) murs ;
- (ii) toit ;
- (iii) planchers extérieurs (le cas échéant) ;
- (iv) vitrage (verre + châssis) ;
- (v) dalle de sol.

Le transfert thermique par transmission des types i) à iv) survient compte tenu du mécanisme de conduction sans les effets de masse (de manière implicite) ; l'apport ou la déperdition de chaleur sont donc proportionnels à l'écart de température entre les environnements intérieur et extérieur ainsi qu'au coefficient de transmission thermique de l'élément, comme l'indiquent les Éq. (3.8), Éq. (3.9)

et Éq. (3.10). Le transfert thermique par transmission au sol repose implicitement sur les effets de l'inertie du sol. Le coefficient de transfert thermique est donc calculé selon une approche différente à celle d'autres composants, Éq. (3.11).

$$Q_{tr} = H_{tr,adj}(\theta_{int,sec} - \theta_e) \cdot t$$

Éq. (3.8)

$$H_{tr,adj} = H_{D,W} + H_{D,R} + H_{D,EF} + H_{D,Gl} + H_{GF}$$

Éq. (3.9)

$$H_D = \sum_i A_i \cdot U_i$$

Éq. (3.10)

$$H_{GF} = b_{tr,g} \cdot A_i \cdot U_{GF}$$

Éq. (3.11)

où

Q_{tr} , transfert thermique total par transmission (kWh) ;

$H_{tr,adj}$, coefficient de transfert thermique total (W/K) ;

$\theta_{int,sec,H}$ et $\theta_{int,sec,C}$, températures de consigne de la zone du bâtiment respectivement pour les modes de chauffage et de refroidissement (°C) ;

t , durée du mois indiquée dans la norme ISO 13790 (Ms) ;

H_D , coefficient de transfert thermique par transmission à l'environnement extérieur (W/K) à travers : les murs, $H_{D,W}$; le toit, $H_{D,R}$; le plancher extérieur, $H_{D,EF}$; les éléments vitrés, $H_{D,Gl}$;

H_{GF} , coefficient de transfert thermique par transmission au sol (W/K) ;

$b_{tr,g}$, facteur d'ajustement du sol mensuel (W/K) ;

A_i , aire de l'élément i (m²) ;

U_i , transmission thermique de l'élément i (W/m².K) ;

U_{GF} , transmission thermique de l'élément de la dalle du système + sol (W/m².K).

Les paramètres temporels utilisés dans les calculs sont extraits de la norme ISO 13790 et sont présentés au Tableau 3.9.

Tableau 3.9: Valeurs temporelles

	JAN	FÉV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AUG	SEP	OCT	NOV	DÉC
<i>m</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DuréeMois, <i>t</i> (Ms)	2,6784	2,4192	2,6784	2,5920	2,6784	2,5920	2,6784	2,6784	2,5920	2,6784	2,5920	2,6784
JourMois (jours)	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
NbJourFct (jours)	23	20	21	22	23	20	23	22	21	23	21	22

Exception faite de celui lié au transfert de chaleur via le sol, tous les coefficients de transmission thermique sont calculés conformément à la norme EN ISO 6946:2007.

Transfert de chaleur vers le sol

Le transfert de chaleur vers le sol est quantifié différemment pour chaque type de système de plancher présenté à la Fig. 3.10.

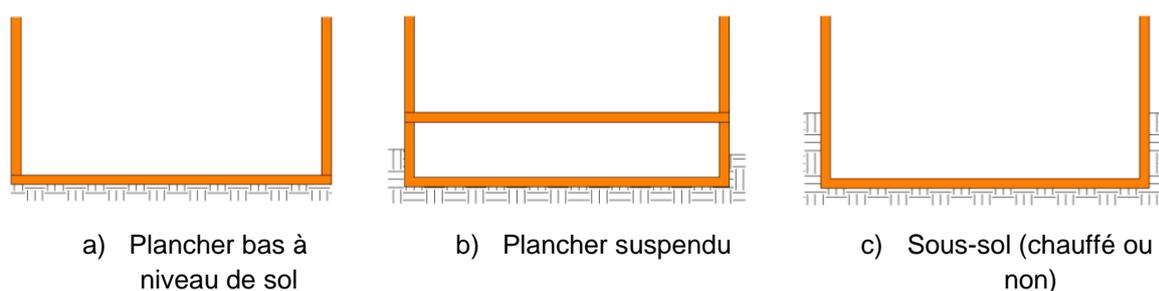


Fig. 3.10: Types de dalle de sol

L'évaluation est effectuée conformément aux lignes directrices de la norme ISO 13370:2007. La quantité de chaleur transférée vers (ou à partir) du sol est calculée en modifiant le coefficient de transmission thermique afin de tenir compte de l'isolation supplémentaire procurée par le sol. Par ailleurs, le coefficient de transfert thermique est également modifié de manière à inclure le flux thermique mensuel, calculé en intégrant l'effet de l'inertie du sol. Les propriétés thermiques du sol utilisées sont détaillées au Tableau 3.10.

Tableau 3.10: Propriétés thermiques du sol (ISO 13370:2007)

	Conductivité thermique λ [W/(m·K)]	Capacité thermique volumique ρc [MJ/(m ³ ·K)]
Argile ou limon	1,5	3,00
Sable ou gravier	2,0	2,00
Roche homogène	3,5	2,00
Par défaut	2,0	2,00

Transmission de chaleur à travers les fenêtres

L'algorithme contient une base de données comportant des valeurs moyennes des propriétés thermiques et optiques de différents types de fenêtre (EN 15 193) telles que reprises au Tableau 3.11, où $g_{gl,n}$ correspond à la transmission d'énergie solaire pour un rayonnement perpendiculaire au vitrage et U_{Gl} à la transmission thermique de la fenêtre.

Tableau 3.11: Valeurs par défaut des propriétés thermiques et optiques des fenêtres

Type d'ouverture	$g_{gl,n}$	U_{Gl}
Simple vitrage	0,87	5,8
Double vitrage	0,78	2,9
Double vitrage à faible émissivité 1	0,72	1,7
Double vitrage à faible émissivité 2	0,67	1,4
Double vitrage à faible émissivité 3	0,65	1,2
Triple vitrage	0,7	2,0
Triple vitrage à faible émissivité 1	0,5	0,8
Triple vitrage à faible émissivité 2	0,5	0,6

La transmission thermique à travers les fenêtres est déterminée à l'aide de l'Éq. (3.10). Toutefois, pour analyser l'incidence positive de l'utilisation nocturne du dispositif d'ombrage, une modification du coefficient de transmission thermique s'impose. La transmission thermique ajustée, $U_{Gl,corr}$ en W/m².K, est calculée comme suit :

$$U_{Gl,corr} = U_{Gl+shut} \cdot f_{shut} + U_{Gl} \cdot (1 - f_{shut})$$

Éq. (3.12)

où

$U_{Gl+shut}$, transmission thermique de l'ensemble formé par la fenêtre et le volet (W/m^2K) ;

f_{shut} , fraction sans dimension de l'écart de température cumulé pour la période durant laquelle le volet est fermé ;

U_{Gl} , transmission thermique de la fenêtre sans volet.

La transmission thermique de la fenêtre lorsque le dispositif d'ombrage est utilisé, $U_{Gl+shut}$, est donnée par l'équation suivante :

$$U_{Gl+shut} = \frac{1}{\frac{1}{U_{Gl}} + R_{sh} + \Delta R}$$

Éq. (3.13)

où

R_{sh} , résistance thermique de la fermeture ($m^2.K/W$) ;

ΔR , résistance thermique supplémentaire pour une perméabilité à l'air spécifique de la fermeture ($m^2.K/W$).

Dans l'algorithme, les valeurs par défaut pour R_{sh} et ΔR sont fournies et sont extraites de la norme ISO 10077-1 (2007). Ces valeurs dépendent du type de matériau de la fermeture et de sa perméabilité à l'air, comme le montre le Tableau 3.12.

Tableau 3.12 – Résistance thermique des fermetures de fenêtre

Type de fermeture	R_{sh} [$m^2.K/W$]	Perméabilité à l'air		
		Haute/très haute	Moyenne	Limitée ou faible
		ΔR [$m^2.K/W$]		
Volet roulant extérieur en aluminium (pas d'isolation)	0,01	0,00	0,12	0,00
Dispositif extérieur opaque en bois (pas d'isolation)	0,10	0,00	0,16	0,00
Fermeture roulante extérieure en bois (pas d'isolation)	0,10	0,00	0,16	0,00
Fermeture roulante extérieure en plastique (pas d'isolation)	0,10	0,00	0,16	0,00
Stores vénitiens extérieurs en bois	0,01	0,09	0,00	0,00
Stores vénitiens métalliques extérieurs	0,01	0,09	0,00	0,00
Store roulant opaque extérieur	0,01	0,09	0,00	0,00

Store roulant translucide extérieur	0,01	0,09	0,00	0,00
Volet intérieur	0,01	0,00	0,00	0,24
Rideaux opaques intérieurs	0,00	0,00	0,00	0,00
Rideaux transparents intérieurs	0,00	0,00	0,00	0,00
Dispositif en bois opaque intérieur	0,10	0,00	0,00	0,31
Volets roulants en plastique avec garniture en mousse	0,15	0,00	0,19	0,00
Volets en bois, de 25 à 30 mm d'épaisseur	0,20	0,00	0,22	0,00

La fraction sans dimension de l'écart de température cumulé d'une période du jour pendant laquelle les volets sont fermés, f_{shut} , précisée dans l'outil a été obtenue à partir des valeurs horaires. Elle a été considérée comme étant égale à la fraction de la période nocturne (protection nocturne).

3.3.3.1.2 TRANSFERT THERMIQUE PAR RENOUVELLEMENT D'AIR

L'une des techniques de refroidissement/chauffage passif consiste à mettre en place les conditions de renouvellement de l'air les plus avantageuses dans le bâtiment afin d'en optimiser la performance thermique. En hiver, il est préférable de réduire le flux d'air de la ventilation afin de limiter les déperditions de chaleur alors qu'en été, il peut être utile d'augmenter le renouvellement de l'air intérieur si la température extérieure permet de bénéficier de cette technique passive. Avec cet algorithme, il est donc possible de définir différents débit d'air pour le chauffage et le refroidissement.

La méthodologie permettant de prendre en compte le transfert thermique par renouvellement d'air est stipulée dans la clause 9.3 de la norme ISO 13790:2008 et se traduit par les formules suivantes :

$$Q_{vs} = H_{vs,adj} (\theta_{int,sec} - \theta_s) \cdot t$$

Éq. (3.14)

$$H_{vs,adj} = \rho_a \cdot c_a \cdot \left(\sum_k b_{vs,k} \cdot q_{vs,k,mn} \right)$$

Éq. (3.15)

$$q_{vs,k,mn} = f_{vs,t,k} \cdot q_{vs,k}$$

Éq. (3.16)

où

$\rho_a \cdot c_a$, capacité thermique volumique de l'air (J/m³.K) ;

$q_{vs,k,mn}$, moyenne temporelle du débit d'air de l'élément du flux d'air k (m³/s);

$b_{vs,k}$, facteur d'ajustement de la température de l'élément du flux d'air k (-).

En l'absence d'un système de pré-chauffage (unité de récupération de chaleur), le facteur d'ajustement de la température, $b_{vs,k}$, est de 1. Pour un bâtiment équipé d'une unité de récupération de chaleur :

$$b_{vs,k} = (1 - f_{vs,frac,k} \cdot \eta_{hru})$$

Éq. (3.17)

où

$f_{vs,frac,k}$, fraction de l'élément du flux d'air k qui traverse l'unité de récupération de chaleur ;

η_{hru} , efficacité de l'unité de récupération de chaleur.

3.3.3.1.3 APPORTS DE CHALEUR INTERNES

La chaleur générée par les occupants et les appareils est calculée à partir des apports internes. Il s'agit d'un paramètre important du bilan thermique du bâtiment. L'algorithme est capable de traiter des données utilisateur ou des valeurs par défaut (extraites de la norme ISO 13790:2008) comprenant les périodes d'occupation hebdomadaire et le flux thermique correspondant. La formule utilisée pour calculer les apports de chaleur des sources de chaleur internes est la suivante :

$$Q_{int} = \left(\sum_k \Phi_{int,mn,k} \right) \cdot t + \left(\sum_k (1 - b_{tr,l}) \Phi_{int,mn,u,l} \right) \cdot t$$

Éq. (3.18)

où

$\Phi_{int,mn,k}$, moyenne temporelle du flux thermique de la source de chaleur interne k (W) ;

$\Phi_{int,mn,u,l}$, moyenne temporelle du flux thermique de la source de chaleur interne l dans l'espace non climatisé adjacent (W) ;

$b_{tr,l}$, facteur de réduction pour l'espace non climatisé adjacent ;

t , durée du mois (Ms).

Les flux thermiques internes d'un bâtiment peuvent être générés par : i) les occupants ; ii) les appareils. Le Tableau 3.13 présente les valeurs de référence du flux thermique des occupants et des appareils.

Tableau 3.13 – Flux thermique des occupants et des appareils dans les bâtiments résidentiels ; données relatives à l'occupation (extrait de la norme ISO 13790:2008)

Jours	Heures	Living + cuisine ($\Phi_{int,oc} + \Phi_{int,A}$)/ A_f [W/m ²]	Autres espaces climatisés (par ex. chambres à coucher) ($\Phi_{int,oc} + \Phi_{int,A}$)/ A_f [W/m ²]
Lundi à vendredi	7h00 à 17h00	8,0	1,0
	17h00 à 23h00	20,0	1,0
	23h00 à 7h00	2,0	6,0
Samedi et dimanche	7h00 à 17h00	8,0	2,0
	17h00 à 23h00	20,0	4,0
	23h00 à 7h00	2,0	6,0

3.3.3.1.4 APPORTS DE CHALEUR SOLAIRES

Ce type d'apport de chaleur est une autre variable majeure de l'équation du bilan thermique du bâtiment. La formule de calcul générale est la suivante :

$$Q_{sol} = \left(\sum_k \Phi_{sol,mn,k} \right) \cdot t + \left(\sum_k (1 - b_{tr,l}) \Phi_{sol,mn,u,l} \right) \cdot t$$

Éq. (3.19)

où

$\Phi_{sol,mn,k}$, moyenne temporelle du flux thermique de la source de chaleur solaire k (W) ;

$\Phi_{sol,mn,u,l}$, moyenne temporelle du flux thermique de la source de chaleur solaire l dans l'espace non climatisé adjacent (W) ;

$b_{tr,l}$, facteur de réduction pour l'espace non climatisé adjacent ;

t , durée du mois (Ms).

Il est nécessaire de calculer la surface effective de captage de chaque élément exposé aux rayonnements solaires. Les méthodes présentées dans la norme ISO 13790 (2008) permettent d'intégrer l'effet des dispositifs d'ombrage, de l'ombrage résultant du bâtiment lui-même et d'autres phénomènes dépendant du climat. Les paragraphes qui suivent s'attardent sur ce point.

Le flux thermique des apports solaires est déterminé par l'expression suivante :

$$\Phi_{sol,mn,k} = F_{sh,ob,k} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k} - F_{r,k} \cdot \Phi_{r,k}$$

Éq. (3.20)

où

$F_{sh,ob,k}$, facteur de réduction de l'ombrage pour les obstacles externes (-) ;

$A_{sol,k}$, surface effective de captage de l'élément k (-) ;

$I_{sol,k}$, rayonnement solaire incident par mètre carré de la surface de captage k (W/m²) ;

$F_{r,k}$, facteur de forme entre l'élément de bâtiment k et le ciel (-) ;

$\Phi_{r,k}$, flux thermique supplémentaire dû au rayonnement thermique vers le ciel de l'élément de bâtiment k (W/m²).

Le facteur de réduction de l'ombrage des obstacles extérieurs, $F_{sh,ob,k}$, n'est pas intégré dans cette version d'AMECO. La surface effective de captage solaire des éléments vitrés est calculée comme suit :

$$A_{sol} = F_{sh,gl} \cdot g_{gl} \cdot (1 - F_F) \cdot A_{w,p}$$

Éq. (3.21)

où

$F_{sh,gl}$, facteur de réduction de l'ombrage des dispositifs d'ombrage amovibles (-) ;

g_{gl} , transmission de l'énergie solaire totale de la partie transparente de l'élément (-) ;

F_F , fraction de la surface du châssis de la fenêtre (-) ;

$A_{w,p}$, surface projetée totale de la fenêtre (m²).

Il est possible de tenir compte de l'effet positif (au cours de la saison de refroidissement par exemple) des dispositifs d'ombrage installés sur les fenêtres. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer le facteur de réduction de l'ombrage de ce dispositif d'ombrage, comme suit :

$$F_{sh,gl} = \frac{(1 - f_{sh,with}) \cdot g_{gl} + f_{sh,with} \cdot g_{gl+sh}}{g_{gl}}$$

Éq. (3.22)

où

g_{gl+sh} , transmission de l'énergie solaire totale de la fenêtre, lorsque le dispositif de protection solaire est activé ;

$f_{sh,with}$, fraction pondérée de temps durant laquelle le dispositif d'ombrage est utilisé.

Les valeurs adoptées pour la transmission de l'énergie solaire de la fenêtre lorsque le dispositif d'ombrage est activé, g_{gl+sh} , sont présentées au Tableau 3.14 et extraites du RCCTE (2006).

Tableau 3.14 : Transmission de l'énergie solaire de la fenêtre lorsque le dispositif d'ombrage est activé, g_{gl+sh}

Type de dispositif d'ombrage	Couleur du dispositif d'ombrage		
	Léger	Intermédiaire	Sombre
Dispositif extérieur opaque en bois (pas d'isolation)	0,03	0,05	0,06
Fermeture roulante extérieure en bois (pas d'isolation)	0,04	0,05	0,07
Fermeture roulante extérieure en aluminium (pas d'isolation)	0,04	0,07	0,09
Fermeture roulante extérieure en plastique (pas d'isolation)	0,04	0,07	0,09
Stores vénitiens extérieurs en bois	0,08	0,08	0,08
Stores vénitiens métalliques extérieurs	0,09	0,09	0,09
Store roulant opaque extérieur	0,04	0,06	0,08
Store roulant translucide extérieur	0,16	0,18	0,2
Volet intérieur	0,47	0,59	0,69
Rideaux opaques intérieurs	0,37	0,46	0,55
Rideaux transparents intérieurs	0,39	0,48	0,58
Dispositif en bois opaque intérieur	0,35	0,46	0,58
Fermetures roulantes extérieures en plastique (avec isolation)	0,04	0,07	0,09
Volets en bois, de 25 à 30 mm d'épaisseur	0,04	0,05	0,07

La fraction pondérée du temps d'utilisation de la protection solaire, $f_{sh,with}$, est calculée pour chaque orientation et est exprimée en valeurs horaires de rayonnement solaire (déterminées à l'aide du logiciel *EnergyPlus*, qui repose sur le modèle Pérez pour les calculs solaires). Il s'agit de la fraction de temps durant laquelle le rayonnement solaire est supérieur à un point de consigne dans une orientation spécifique.

Dans le cas d'une fenêtre avec un verre non diffusant et sans dispositif d'ombrage, la transmission de l'énergie solaire totale, g_{gl} , est calculée comme suit :

$$g_{gl} = g_{gl,n} \cdot F_w$$

Éq. (3.23)

où

F_w , facteur de correction pour un vitrage non diffusant (-) ;

$g_{gl,n}$, transmission de l'énergie solaire pour un rayonnement perpendiculaire au vitrage ou CARS (-).

Toutefois, pour des fenêtres comportant des dispositifs d'ombrage ou un vitrage diffusant, il est alors nécessaire de calculer une transmission solaire moyenne temporelle en fonction d'une somme pondérée des fractions directes et diffuses du rayonnement solaire. Ce paramètre est calculé sur une base mensuelle à l'aide de l'Éq. (3.24).

$$g_{gl} = a_{gl} \cdot g_{gl,dif} + (1 - a_{gl}) \cdot g_{gl,dif}$$

Éq. (3.24)

$$alt_g = \frac{\sum_1^n a_i \cdot I_{dir,i}}{\sum_1^n I_{dir,i}}$$

Éq. (3.25)

$$a_{gl} = \frac{\sum_1^n I_{dir,i}}{\sum_1^n I_{sol,i}}$$

Éq. (3.26)

où

a_{gl} , facteur de pondération, dépendant de la position (orientation, inclinaison) de la fenêtre, du climat et de la saison (-) ;

$g_{gl,alt}$, transmission de l'énergie solaire pour un rayonnement solaire selon un angle d'altitude donné, alt_{gl} , représentatif de la position (orientation, inclinaison) de la fenêtre, du climat et de la saison (-) ;

$g_{gl,dif}$, transmission de l'énergie solaire pour un rayonnement solaire diffus isotrope (-) ;

$I_{dir,i}$, rayonnement solaire moyen horaire direct i (W/m²) ;

I_{sol} , rayonnement solaire moyen horaire total i (W/m²) ;

α_i , angle d'incidence solaire (°) ;

n , nombre d'heures au cours du mois.

Le rayonnement solaire total et direct et l'angle d'incidence solaire, respectivement $I_{dir,i}$, I_{sol} et α_i , ont été calculés à l'aide d'*EnergyPlus*, qui utilise le modèle Pérez pour les calculs solaires.

La fraction du châssis de la fenêtre, F_F , est calculée sur la base de la norme ISO 10077-1 (2006). Les valeurs de 0,2 et 0,3 peuvent être utilisées, quelle que soit celle qui procure la valeur de transmission maximale pour la fenêtre. La valeur par défaut pour les climats pour lesquels le chauffage est prédominant, 0,3, a été adoptée (ISO 13790, note de la clause 11.4.5).

La surface projetée totale de la fenêtre, $A_{w,p}$, inclut la vitre et le châssis, étant donné que les caractéristiques thermiques de la fenêtre consignées dans l'outil valent pour l'élément dans son ensemble (verre et châssis). Par ailleurs, cette méthodologie est également recommandée dans l'annexe B de la norme ISO 13789:2007.

La surface effective de captage solaire des éléments opaques est donnée par l'équation

$$A_{sol} = \alpha_{S,c} \cdot R_{se} \cdot U_c \cdot A_c$$

Éq. (3.27)

où

$\alpha_{S,c}$, coefficient d'absorption sans dimension du rayonnement solaire de la partie opaque ;

- R_{se} , coefficient de résistance thermique superficielle extérieure de la partie opaque, déterminé conformément à la norme ISO 6946:2007 ($m^2.K/W$) ;
- U_c , transmission thermique de la partie opaque, déterminée conformément à la norme ISO 6946:2007 ($W/m^2.K$) ;
- A_c , surface projetée (sur un plan parallèle à la surface) de la partie opaque (m^2).

Le coefficient d'absorption sans dimension du rayonnement solaire est fonction de la couleur de la surface extérieure de la partie opaque comme le précise le tableau suivant (RCCTE, 2006).

Tableau 3.15 : Coefficient d'absorption pour le rayonnement solaire (RCCTE, 2006)

Couleur	$\alpha_{s,c}$
Léger	0,3
Moyenne	0,5
Sombre	0,8

Le rayonnement solaire incident, $I_{sol,k}$, est une valeur moyenne pour le pas de temps du mois du calcul. De toute évidence, il dépend du climat, de la latitude et de la position (orientation et inclinaison).

Les valeurs du facteur de forme pour le rayonnement entre l'élément et le ciel, $F_{r,k}$, sont de 1,0 et 0,5 respectivement pour les éléments horizontaux et verticaux sans ombrage.

Le rayonnement thermique vers le ciel, $\Phi_{r,k}$, est inclus dans les apports solaires. Toutefois, il s'agit d'un transfert thermique par rayonnement résultant de la différence de température entre la surface de l'élément (en supposant qu'elle équivaut à la température extérieure) et la voûte céleste. L'Éq. (3.28) permet de calculer ce phénomène de transfert thermique :

$$\Phi_{r,k} = R_{se} \cdot U_c \cdot A_c \cdot h_r \cdot \Delta\theta_{er}$$

Éq. (3.28)

où

- h_r , coefficient de transfert thermique par rayonnement externe ($W/m^2.K$) ;
- $\Delta\theta_{er}$, écart moyen entre la température de l'air extérieur et la température apparente du ciel, ($^{\circ}C$).

La norme ISO 13790:2008 part du principe que le coefficient de transfert thermique par rayonnement externe, h_r (W/m².K), peut être pris égal à $5.\varepsilon$ (où ε est l'émissivité du matériau), ce qui équivaut à une température moyenne de 10°C de la surface et de la température du ciel.

Selon la norme ISO 13970 (clause 11.4.6), l'écart moyen entre la température de l'air extérieur et la température apparente du ciel, $\Delta\theta_{er}$, peut être considérée comme équivalant à 9°C dans les régions subpolaires, à 13°C dans les régions tropicales et à 11°C dans les régions intermédiaires.

3.3.3.1.5 PARAMÈTRES DYNAMIQUES

Pour le mode de chauffage, le facteur d'utilisation des apports, $\eta_{H,gn,m}$ est donné par les équations suivantes :

$$\text{Si } \gamma_H > 0 \text{ et } \gamma_H \neq 1, \text{ alors : } \eta_{H,gn} = \frac{1-\gamma_H^{a_H}}{1-\gamma_H^{a_H+1}}$$

Éq. (3.29)

$$\text{Si } \gamma_H = 1, \text{ alors : } \eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H+1}$$

Éq. (3.30)

$$\text{Si } \gamma_H < 0, \text{ alors : } \eta_{H,gn} = \frac{1}{\gamma_H}$$

Éq. (3.31)

où

$\gamma_H = Q_{H,gn}/Q_{H,ht}$ est le ratio de bilan thermique ;

$a_H = a_{H,0} + \tau/\tau_{H,0}$ est un paramètre sans dimension ;

$\tau = C_m/H$ est la constante de temps de la zone du bâtiment ; tient compte de l'inertie thermique de ce dernier ainsi que du transfert thermique par transmission et par renouvellement d'air ;

$a_{H,0}$ et $\tau_{H,0}$ sont des paramètres sans dimension respectivement d'une valeur de 1 et de 15 (valeurs de la norme ISO 13790).

Le facteur d'utilisation mensuel pour le mode de refroidissement est calculé à l'aide de l'une des formules suivantes :

$$\text{Si } \gamma_C > 0 \text{ et } \gamma_C \neq 1, \text{ alors : } \eta_{C,Is} = \frac{1-\gamma_C^{-a_C}}{1-\gamma_C^{-(a_C+1)}}$$

Éq. (3.32)

$$\text{Si } \gamma_C = 1, \text{ alors : } \eta_{C,Is} = \frac{a_C}{a_C+1}$$

Éq. (3.33)

$$\text{Si } \gamma_C < 0, \text{ alors : } \eta_{C,Is} = 1$$

Éq. (3.34)

Les paramètres utilisés pour déterminer les facteurs d'utilisation sont similaires à ceux indiqués pour le mode de chauffage, mais avec les valeurs correspondant au mode de refroidissement (il est également considéré que les paramètres sans dimension $a_{C,0}$ et $\tau_{C,0}$ équivalent respectivement à 1 et 15 dans la norme ISO 13790).

La masse intérieure du bâtiment est intégrée dans les calculs par le biais de la constante de temps du bâtiment, τ , exprimée en heures. Cette valeur est déterminée par l'équation

$$\tau = \frac{C_m}{3600 \cdot (H_{tr,adj} + H_{vs,adj})}$$

Éq. (3.35)

où

C_m , capacité thermique intérieure du bâtiment ou de la zone du bâtiment (J/K) ;

$H_{tr,adj}$, coefficient de transfert thermique global représentatif calculé à partir de l'Éq. (3.9) ;

$H_{vs,adj}$, coefficient de transfert thermique global représentatif calculé à partir de l'Éq. (3.15).

La capacité thermique intérieure du bâtiment, C_m (J/K), a été calculée en totalisant les capacités thermiques de l'ensemble des éléments de construction du bâtiment en contact thermique direct avec l'air intérieur du bâtiment (ISO 13970), comme indiqué dans l'équation suivante :

$$C_m = \sum_j k_j \cdot A_j$$

Éq. (3.36)

où

k_j correspond à la capacité thermique surfacique intérieure de l'élément de construction du bâtiment j (J/K.m²) ;

A_j correspond à la surface de l'élément de construction du bâtiment j (m²).

La capacité thermique surfacique intérieure, k_j , a été calculée pour chaque macro-composant conformément aux lignes directrices de l'Annexe A de la norme ISO EN ISO 13786:2007, laquelle traite d'une méthode simplifiée pour cette évaluation. Afin de déterminer rapidement la capacité thermique intérieure du bâtiment, la norme ISO 13790 fournit des valeurs par défaut par mètre carré pour une classe de bâtiment donnée. Elles sont reprises au Tableau 3.16 pour la méthode mensuelle et saisonnière.

Tableau 3.16 – Valeurs par défaut de la capacité thermique intérieure (ISO 13790, 2008)

Catégorie	C_m [J/K]
Très léger	80000. A_f
Léger	110000. A_f
Moyenne	165000. A_f
Lourd	260000. A_f
Très lourd	370000. A_f

A_f - Surface de plancher

Durée des mois de chauffage et de refroidissement

Afin d'estimer les mois nécessitant une consommation énergétique à des fins de chauffage ou de refroidissement, la norme ISO 13970 prescrit deux méthodes d'évaluation, basées sur le ratio de bilan thermique et le paramètre sans dimension, a_C et a_H . Bien que la norme référencée propose deux méthodes, seule celle qui est détaillée est examinée et présentée ici (clause 7.4.1.1 – méthode b), étant donné qu'elle peut être implémentée dans l'outil.

Mode de chauffage :

Pour estimer la fraction du mois durant laquelle une consommation énergétique s'impose pour chauffer les locaux, il convient d'abord de calculer un ratio de bilan

thermique idéal, $\gamma_{H,lim}$, qui correspond à un facteur d'utilisation des apports idéal, $\eta_{H,gn}$. Ce dernier prend une valeur qui rend nul le besoin énergétique pour le chauffage des locaux. Ce raisonnement est basé sur un bâtiment idéal ayant une inertie thermique infinie, où $\gamma_{H,lim} = 1.0$ et donc $\eta_{H,gn} = 1.0$. Étant donné qu'un bâtiment réel a une inertie thermique limitée, tous les apports de chaleur ne sont pas efficaces pour chauffer les locaux et augmenter la température intérieure jusqu'à la température de confort (en raison de la surchauffe). Dès lors, le facteur d'utilisation des apports est inférieur et il est nécessaire d'avoir plus d'apports pour équilibrer l'équation du bilan thermique et rendre le besoin énergétique nul. Ce raisonnement n'est pas applicable au transfert de chaleur (si le ratio de bilan thermique est inférieur à 1, le transfert de chaleur est supérieur aux apports de chaleur. Le facteur d'utilisation thermique ne pouvant avoir une valeur supérieure à 1, il est impossible de rendre le besoin énergétique nul et donc de déterminer un ratio de bilan thermique optimal inférieur à 1,0). Une explication graphique est proposée à la Fig. 3.11.

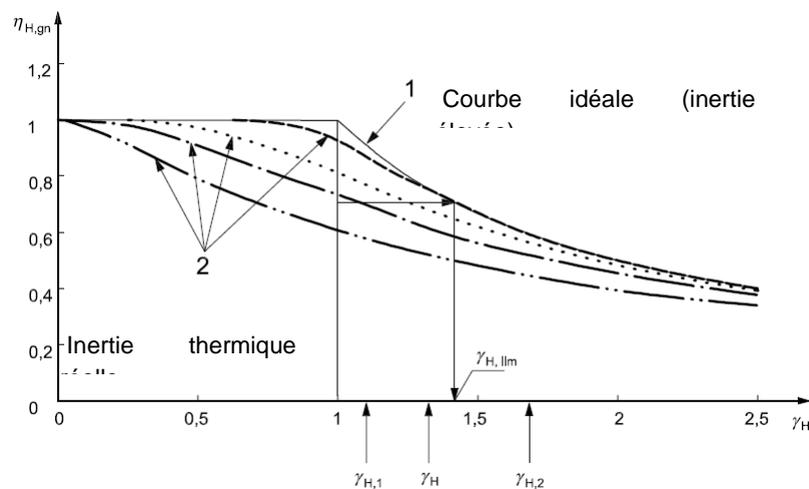


Fig. 3.11: Paramètres pertinents pour déterminer la fraction du mois qui fait partie de la saison de chauffage et de refroidissement (ISO 13790)

Le ratio de bilan thermique optimal est calculé comme suit :

$$\gamma_{H,lim} = \frac{(a_H + 1)}{a_H}$$

Éq. (3.37)

Pour calculer la fraction du mois marquée par un besoin énergétique pour le chauffage, il convient de déterminer γ_H en début et en fin de mois. La moyenne du γ_H pour le début des mois est déterminée en calculant la moyenne du γ_H au cours

du mois analysé et du mois précédent. Le paramètre pour γ_H en fin de mois équivaut à la moyenne du γ_H du mois analysé et du mois suivant. Par ailleurs, deux "nouveaux" paramètres sont nécessaires : $\gamma_{H,1}$ et $\gamma_{H,2}$. Le premier est obtenu par la plus faible des deux γ_H déterminée par le calcul précédent et $\gamma_{H,2}$ correspond au maximum. Ces paramètres ($\gamma_{H,1}$ et $\gamma_{H,2}$) correspondent aux ratios de bilan thermique respectivement en début et en fin de mois et sont calculés comme suit :

$$\text{Si } \gamma_{H,2} < \gamma_{H,\text{lim}}, \text{ alors } f_H = 1$$

Éq. (3.38)

$$\text{Si } \gamma_{H,1} > \gamma_{H,\text{lim}}, \text{ alors } f_H = 0$$

Éq. (3.39)

L'équation (3.39) signifie que si le ratio de bilan thermique au début et à la fin du mois est supérieur à la valeur optimale, il ne sera pas nécessaire de chauffer les locaux au cours du mois concerné. Toutefois, si aucune de ces conditions n'est respectée, le raisonnement suivant s'applique :

$$\text{Si } \gamma_H > \gamma_{H,\text{lim}}, \text{ alors } f_H = 0,5 \cdot \frac{\gamma_{H,\text{lim}} - \gamma_{H,1}}{\gamma_H - \gamma_{H,1}}$$

Éq. (3.40)

$$\text{Si } \gamma_H \leq \gamma_{H,\text{lim}}, \text{ alors } f_H = 0,5 + 0,5 \cdot \frac{\gamma_{H,\text{lim}} - \gamma_H}{\gamma_{H,2} - \gamma_H}$$

Éq. (3.41)

La logique de ces équations est similaire à celle des équations (3.38) et (3.39), à une exception près : pour les équations (3.40) et (3.41), γ_H correspond à une valeur mensuelle moyenne et non à une valeur au début et à la fin du mois.

La durée de la saison de chauffage peut elle aussi être déterminée par la somme des f_H , calculée pour chaque mois, à savoir :

$$L_H = \sum_{m=1}^{12} f_{H,m}$$

Éq. (3.42)

Mode de refroidissement :

Le raisonnement tenu pour le mode de chauffage est applicable au mode de refroidissement. Dès lors, aucune explication complémentaire ne sera fournie ici. La fraction du mois marquée par un besoin énergétique pour le refroidissement est calculée en appliquant l'inverse du ratio de bilan thermique optimal, $(1/\gamma_c)_{lim}$. Ce paramètre est calculé comme suit :

$$(1/\gamma_c)_{lim} = (a_c + 1)/a_c$$

Éq. (3.43)

Les paramètres limites, $(1/\gamma_c)_1$ et $(1/\gamma_c)_2$ sont alors déterminés par les équations (3.44) et (3.45) :

$$\text{Si } (1/\gamma_c)_2 < (1/\gamma_c)_{lim}, \text{ alors } f_c = 1$$

Éq. (3.44)

$$\text{Si } (1/\gamma_c)_1 > (1/\gamma_c)_{lim}, \text{ alors } f_c = 0$$

Éq. (3.45)

S'agissant du mode de chauffage, si aucune de ces conditions n'est vérifiée, alors :

$$\text{Si } (1/\gamma_c) > (1/\gamma_c)_{lim}, \text{ alors } f_c = 0,5 \cdot \frac{(1/\gamma_c)_{lim} - (1/\gamma_c)_1}{(1/\gamma_c) - (1/\gamma_c)_1}$$

Éq. (3.46)

$$\text{Si } (1/\gamma_c) \leq (1/\gamma_c)_{lim}, \text{ alors } f_c = 0,5 + 0,5 \cdot \frac{(1/\gamma_c)_{lim} - (1/\gamma_c)}{(1/\gamma_c)_2 - (1/\gamma_c)}$$

Éq. (3.47)

La saison de refroidissement peut être également calculée en additionnant tous les f_c de chaque mois, comme le montre l'équation (3.48) :

$$L_c = \sum_{m=1}^{12} f_{c,m}$$

Éq. (3.48)

Besoin énergétique pour les systèmes fonctionnant par intermittence

Lorsque les systèmes HVAC fonctionnent selon un horaire (à savoir en mode intermittent), la norme ISO 13790 (2008) fournit des lignes directrices pour déterminer une réduction des besoins énergétiques à partir des calculs du mode continu, tels que détaillés précédemment à l'Éq. (3.6) et à l'Éq. (3.7). Pour y parvenir, il s'agit de réduire le besoin énergétique pour le chauffage et le refroidissement, $Q_{H,nd}$ et $Q_{C,nd}$, en appliquant un facteur de réduction sans dimension pour le chauffage et le refroidissement intermittents, $\alpha_{C,red}$ et $\alpha_{H,red}$. Les fractions du mois caractérisées par un besoin énergétique en mode de chauffage et de refroidissement, $f_{H,m}$ et $f_{C,m}$, sont également utilisées ici. Dès lors,

$$Q_{H,nd,interm,m} = f_{H,m} \cdot \alpha_{H,red} \cdot Q_{H,nd,cont,m}$$

Éq. (3.49)

$$Q_{C,nd,interm,m} = f_{C,m} \cdot \alpha_{C,red} \cdot Q_{C,nd,cont,m}$$

Éq. (3.50)

La constante de temps du bâtiment, τ , et les ratios de bilan thermique, γ_H et γ_C , ont également une incidence sur le facteur de réduction des besoins énergétiques compte tenu du fonctionnement par intermittence des systèmes HVAC, comme le montrent les équations suivantes :

$$\alpha_{H,red} = 1 - b_{H,red} \cdot \frac{\tau_{H,0}}{\tau} \cdot \gamma_H \cdot (1 - f_{H,hr}), \text{ avec } f_{H,hr} \leq \alpha_{H,red} \leq 1.0$$

Éq. (3.51)

$$\alpha_{C,red} = 1 - b_{C,red} \cdot \frac{\tau_{C,0}}{\tau} \cdot \gamma_C \cdot (1 - f_{C,day}), \text{ avec } f_{C,day} \leq \alpha_{C,red} \leq 1.0$$

Éq. (3.52)

où

b_{red} est un paramètre constant, considéré comme équivalent à 3 (pour les modes de chauffage et de refroidissement) ;

$f_{H,hr}$ est la fraction du nombre d'heures de fonctionnement des systèmes ;

$f_{C,day}$, représente la fraction du nombre de jours de la semaine au cours desquels les systèmes sont activés.

3.3.3.2 Besoin énergétique pour la production d'eau chaude sanitaire

Le besoin énergétique pour la production d'eau chaude sanitaire, $MJ/month$, est calculé conformément à la norme EN 15316-3-1 (2007). Il est en fonction du type de bâtiment, de sa surface de plancher et de la différence de température entre l'eau d'admission et celle souhaitée au point de puisage, selon l'expression suivante :

$$Q_{DHW,nd,m} = 4,182 \cdot V_{W,m} \cdot (\theta_{W,t} - \theta_{W,o})$$

Éq. (3.53)

où

$V_{W,m}$ correspond au volume d'eau chaude sanitaire mensuel nécessaire tel que prescrit par la norme EN 15316-3-1 (2007) ;

$\theta_{W,t}$ correspond à la température de l'eau chaude sanitaire au point de puisage [°C] ;

$\theta_{W,o}$, température de l'eau d'admission [°C].

Pour une maison individuelle, le volume quotidien du besoin en eau chaude sanitaire est fonction de la surface de plancher ; il est calculé (en m³/jour) comme suit :

$$V_w = \frac{\alpha \cdot N_U}{1000}$$

Éq. (3.54)

où

α , besoin de l'unité en litres d'eau à 60°C/jour ;

N_U , nombre d'unités à prendre en compte.

Le volume mensuel d'eau chaude sanitaire nécessaire, $V_{w,m}$, peut être obtenu en multipliant la valeur quotidienne, V_w , par le nombre de jours du mois.

Les paramètres, α et N_U , sont fonction du type de bâtiment et de son occupation/activité ; ils peuvent être calculés en fonction de la surface de plancher, A_f , comme suit :

$$\text{Si } A_f > 30m^2, \text{ alors } \alpha = \frac{62 \cdot \ln(A_f) - 160}{A_f}$$

Éq. (3.55)

$$\text{Si } 15 \leq A_f \leq 30m^2, \text{ alors } a = 2$$

Éq. (3.56)

3.3.3.3 Consommation énergétique

Le besoin énergétique calculé ne tient pas compte du rendement des systèmes installés dans le bâtiment pour climatiser l'espace intérieur et produire l'eau chaude sanitaire. L'algorithme part du principe que le bâtiment peut être doté de systèmes ayant des rendements différents, étant donné qu'il est rare que les coefficients de performance (COP) pour le chauffage et le refroidissement soient les mêmes. Dès lors, le moindre besoin énergétique (refroidissement ou chauffage des locaux, production d'eau chaude sanitaire) varie en fonction du rendement de l'équipement correspondant. Voici la formule générale du calcul de la consommation énergétique qui peut être appliquée à chaque type de besoin énergétique :

$$Q_{cons} = \frac{Q_{nd}}{\eta_{sys}}$$

Éq. (3.57)

où

Q_{nd} , besoin énergétique ;

η_{sys} , rendement du système.

Les valeurs par défaut adoptées pour le rendement énergétique du système et le type d'énergie consommée sont précisées dans les tableaux ci-après. La majeure partie de ces valeurs ont été extraites du RCCTE (2006).

Tableau 3.17: Rendement et énergie consommée par le système de chauffage des locaux

Système de chauffage	$\eta_{H,sys}$	Type d'énergie
Résistance électrique	1	Électricité
Chauffage au combustible gazeux	0,87	Combustible gazeux
Chauffage au combustible liquide	0,8	Combustible liquide
Chauffage au combustible liquide	0,6	Combustible liquide
Bibloc (chauffage)	4	Électricité

Tableau 3.18: Rendement et consommation énergétique d'un système de refroidissement des locaux

Système de chauffage	$\eta_{C,sys}$	Type d'énergie
Bibloc (refroidissement)	3	Électricité
Machine frigorifique (cycle à compression)	3	Électricité
Machine frigorifique (cycle à absorption)	0,8	Électricité

Tableau 3.19: Rendement et consommation énergétique d'un système de production d'eau chaude sanitaire

Système de chauffage	$\eta_{DHW,sys}$	Type d'énergie
Chaudière électrique	0,9	Électrique
Chaudière au gaz	0,6	Gaz
Appareil de chauffage à condensation instantané	0,72	Gaz
Chauffage instantané	0,4	Gaz

La consommation énergétique totale du bâtiment équivaut à la somme de toutes les consommations d'énergie :

$$Q_{Tot,cons} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_{H,sys}} + \frac{Q_{C,nd}}{\eta_{C,sys}} + \frac{Q_{DHW,nd}}{\eta_{DHW,sys}}$$

Éq. (3.58)

L'énergie primaire est calculée en multipliant le facteur de conversion, F_{pu} , [kgoe/kWh] par la consommation énergétique.

$$Q_{Tot,prim} = F_{H,pu} \cdot Q_{H,cons} + F_{C,pu} \cdot Q_{C,cons} + F_{DHW,pu} \cdot Q_{DHW,cons}$$

Éq. (3.59)

Le facteur de conversion de la consommation (ou utilisation) énergétique à l'énergie primaire dépend du combustible (ou du type d'énergie) pour chaque système. Les valeurs par défaut ont été extraites du RCCTE (2006) et sont présentées au Tableau 3.20.

Tableau 3.20: Facteur de conversion de la consommation énergétique à l'énergie primaire (RCCTE, 2006)

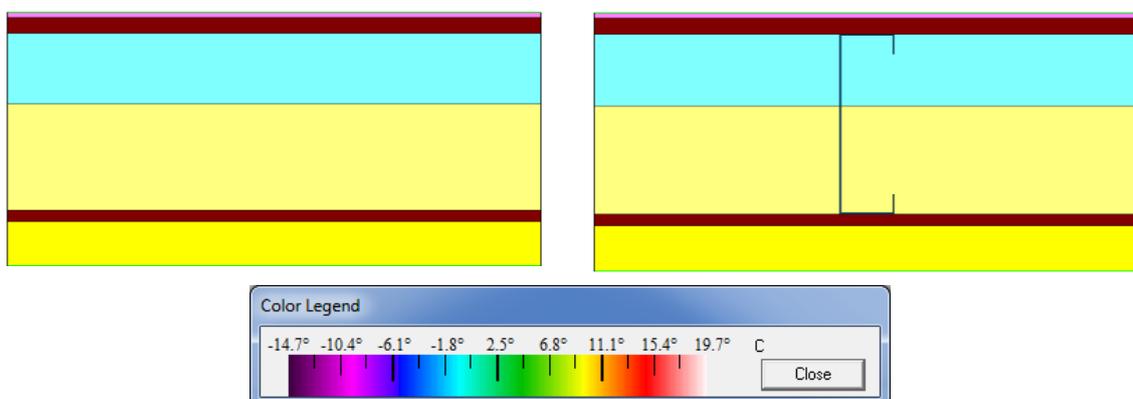
Type d'énergie	F_{pu} [kgoe/kWh]
Électricité	0,29
Combustible gazeux, liquide ou solide	0,086

3.3.3.4 Inertie thermique

En ce qui concerne l'inertie thermique, la capacité thermique intérieure du bâtiment, C_m , des calculs ont été effectués conformément aux indications de la norme ISO 13790 et comme l'équation (3.36) l'a précédemment montré. La capacité thermique surfacique intérieure de chaque macro-composant a été calculée en respectant les prescriptions reprises à l'annexe A de la norme EN ISO 13786 (2007). Cette procédure simplifiée est basée sur la profondeur de pénétration de l'onde de chaleur, calculée pour les matériaux adjacents à la surface intérieure ; elle convient pour ce type de calcul. La méthode prescrite tient compte de la capacité thermique des couches, jusqu'à une épaisseur maximale de 100 mm (à partir de la surface intérieure).

3.3.3.5 Ponts thermiques

L'impact de ponts thermiques récurrents (générés notamment par des montants en acier, comme illustré à la Fig. 3.12) au sein des éléments de construction (les murs et les dalles par exemple) est intégré dans la transmission thermique (valeur U). L'impact des ponts thermiques linéaires et ponctuels n'est pas pris en compte. La valeur U est intégrée dans la base de données du logiciel pour chaque macro-composant.



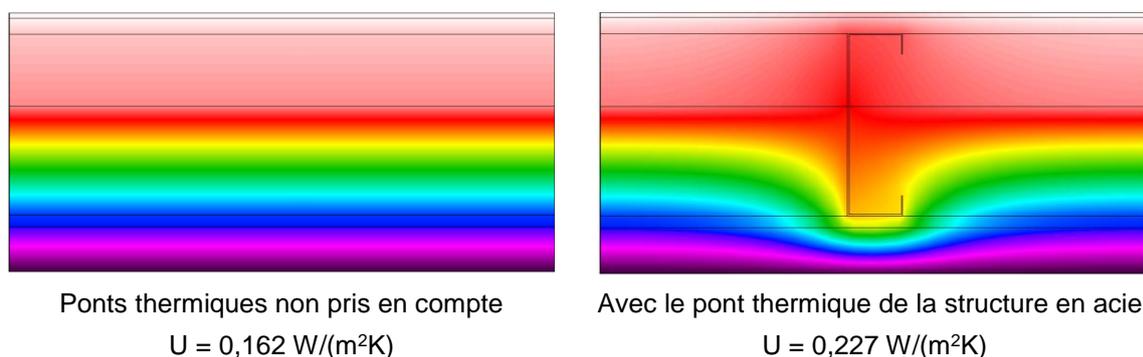


Fig. 3.12: Effet des ponts thermiques sur les valeurs de transmission thermique pour un plancher extérieur avec structure en acier léger

La valeur U des éléments a été déterminée à l'aide de la méthode présentée à la Section 6 de la norme ISO 6946 (2007) et perfectionnée par Gorgolewski (2007), la première ne pouvant être utilisée que si la couche isolante n'est pas reliée par des structures en acier. La deuxième méthode consiste à déterminer deux limites pour la résistance thermique de l'élément de construction ainsi que les facteurs de correction en fonction des dimensions et de l'espacement des montants. Une limite inférieure est calculée en combinant les résistances parallèles des couches, en supposant que la température de chaque plan soit identique. Un seuil de résistance thermique supérieur est également calculé en additionnant les résistances de chaque chemin thermique.

Lorsque l'élément ne comporte pas de pont thermique, on applique la méthode développée pour les couches homogènes, qui tient compte du circuit de résistances thermiques en série.

3.3.4 Calibration de l'algorithme

Afin de vérifier et d'améliorer la précision de l'algorithme utilisé pour prédire l'énergie de fonctionnement nécessaire au chauffage et au refroidissement des locaux d'un bâtiment, en fonction de la méthode quasi-stationnaire de la norme ISO 13790, plusieurs vérifications et procédures de calibration ont été effectuées.

Tout d'abord, la précision de l'algorithme est vérifiée en l'appliquant aux douze cas d'étude prescrits par la norme EN 15265 pour un compartiment de bureau. Ensuite, étant donné que dans la réalité, les bâtiments comportent plusieurs zones et qu'ils sont donc complexes, l'algorithme est étalonné pour un bâtiment résidentiel à plusieurs zones, en utilisant les facteurs de correction appliqués aux quatre composants principaux du bilan thermique d'un bâtiment et aux paramètres dynamiques sans dimension.

Enfin, dans la section 4.2, l'algorithme étalonné ainsi obtenu est validé en l'appliquant à une étude de cas (bâtiment résidentiel bas) et en comparant les résultats ainsi obtenus à ceux de l'analyse dynamique réalisée avec *DesignBuilder / EnergyPlus*.

3.3.4.1 Contrôle de la précision dans le cadre de la norme EN 15265

Cette rubrique présente plusieurs cas d'étude visant à contrôler la précision de l'algorithme mensuel, sur la base des 12 cas d'étude (Tableau 3.21) prescrits dans la norme EN 15265 (2007) pour un compartiment de bureaux (Fig. 3.13). Cette norme est basée sur une pièce de référence dotée d'un élément vitré orienté à l'ouest, analysée en fonction de diverses conditions limites, des variations des apports internes et solaires ainsi que de deux types de mode de chauffage/refroidissement: continu et intermittent. Pour chacun des douze cas d'étude, la norme fournit des résultats de référence pour les besoins énergétiques en matière de chauffage et de refroidissement d'un lieu spécifique (Trappes, France) pour lequel des données climatiques précisant les valeurs horaires de la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire, sont également fournies.

Tableau 3.21: Cas d'étude prescrits dans la norme EN 15265 (2007) pour valider le calcul des besoins énergétiques pour le chauffage et le refroidissement des locaux à l'aide de méthodes dynamiques

Informatif	Normatif	Normatif
Essai 1 Cas de référence	Essai 5 = Essai 1 +	Essai 9 = Essai 5 +
Essai 2 Inertie thermique supérieure	Essai 6 = Essai 2 +	Essai 10 = Essai 6 +
Essai 3 Pas d'apports internes	Essai 7 = Essai 3 +	Essai 11 = Essai 7 +
Essai 4 Pas de protection solaire	Essai 8 = Essai 4 +	Essai 12 = Essai 8 +
	HVAC intermittent (uniquement de 8h00 à 18h00 du lundi au vendredi)	Toit extérieur

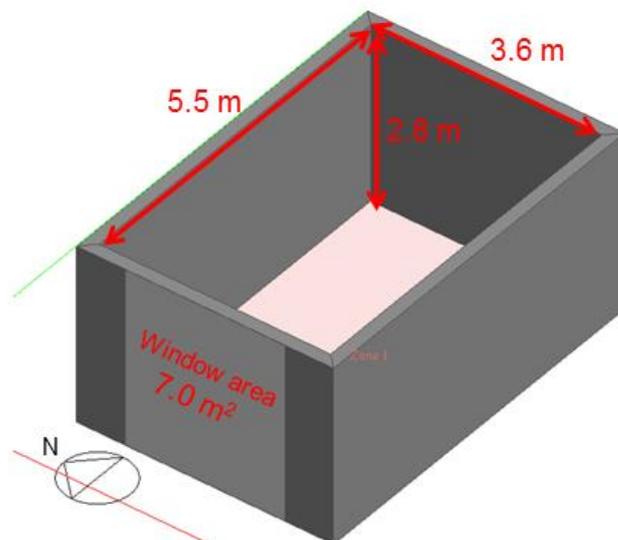
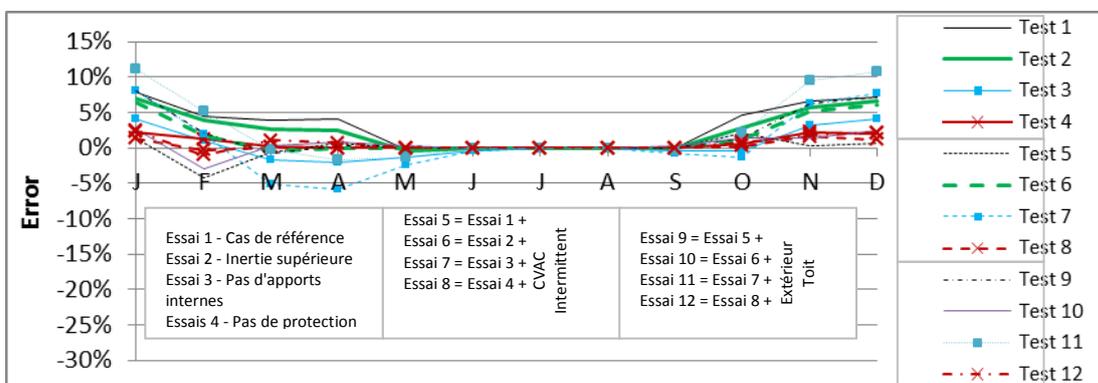
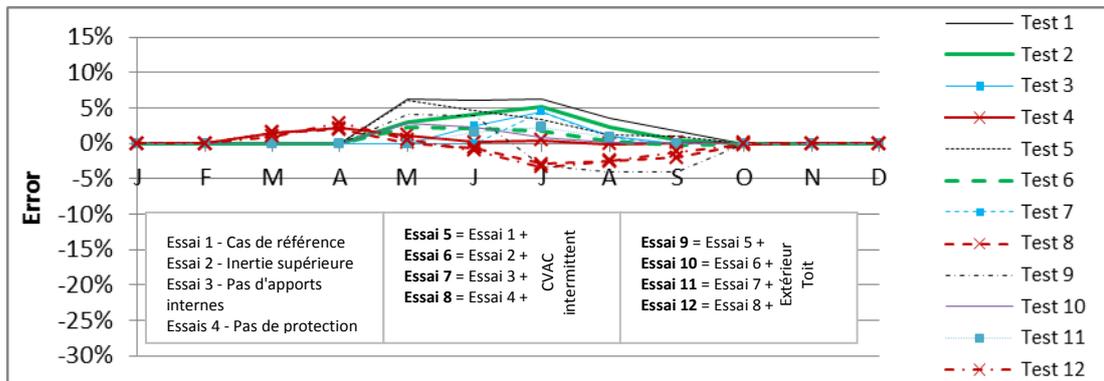


Fig. 3.13: Modèle du compartiment de bureaux tel que prescrit dans la norme EN 15265

Étant qu'il était primordial d'évaluer l'exactitude des termes du bilan thermique et que ceux-ci ne sont pas précisés dans la norme EN 15265, les cas d'étude ont également été calculés dans le logiciel de calcul dynamique *DesignBuilder* qui utilise l'algorithme du programme de simulation énergétique *EnergyPlus*. La salle d'essai a été entièrement définie dans le logiciel dynamique et dans l'algorithme mensuel afin de générer les estimations des besoins énergétiques. La Fig. 3.14 présente les erreurs obtenues avec la méthode quasi stationnaire sur une base mensuelle (en faisant référence aux résultats de la simulation dynamique obtenus à l'aide de l'algorithme du programme *EnergyPlus*) et calculée en tant que pourcentage du besoin énergétique annuel total. L'erreur mensuelle maximale est inférieure à 12% comme le montre la Fig. 3.14. L'erreur est plus importante au cours des mois d'été et d'hiver respectivement pour les modes de refroidissement et de chauffage.



a) Mode de chauffage



b) Mode de refroidissement

Fig. 3.14: Erreurs mensuelles de l'algorithme (méthode quasi-stationnaire mensuelle) - résultats de référence : EnergyPlus (méthode dynamique horaire avancée)

3.3.4.2 Facteurs de calibration

La méthode quasi stationnaire mensuelle procède à plusieurs simplifications par rapport aux simulations dynamiques avancées (basées sur des données horaires). Ces différences résultent directement de plusieurs paramètres :

- (i) les facteurs d'utilisation mensuels dynamiques, $\eta_{H,gn,m}$ et $\eta_{C,ls,m}$, supposés constants et indépendants des données climatiques et des périodes d'occupation, pour chaque région climatique ;
- (ii) les diverses conditions énergétiques ; Q_{tr} , Q_{ve} , Q_{int} et Q_{sol} , sont calculées pour des températures intérieures constantes telles que définies par les points de consigne des saisons de chauffage et de refroidissement.

Par ailleurs, les données climatiques, les périodes d'occupation ainsi que l'agencement du bâtiment ont eux aussi une incidence indirecte sur les paramètres précités.

Dès lors, malgré la bonne concordance de la méthode quasi-stationnaire mensuelle pour les cas d'étude prescrits dans la norme EN 15265, la performance des bâtiments réels qui ont des agencements et des conditions d'utilisation plus complexes avec des climats différents, peut varier fortement par rapport aux résultats de cette méthode simplifiée. La norme ISO 13790 tient compte de cela et fait part d'écart éventuels de 50% à 150%: elle fournit donc une procédure de calcul des facteurs d'utilisation mensuels (Annexe I de la norme ISO 13790).

Afin de limiter cette variabilité éventuelle, de nouveaux facteurs de correction ont été définis et étalonnés pour améliorer les estimations des diverses grandeurs énergétiques : i) transfert thermique par transmission ; ii) transfert thermique par

renouvellement d'air ; iii) apports de chaleur internes ; iv) apports de chaleur solaires ; tels qu'indiqués dans les équations (3.60) à (3.62),

$$H_{tr,adj,c} = f_{tr} \cdot H_{tr,adj} \rightarrow Q_{tr,m} = H_{tr,adj,c} \cdot (\theta_{int,sec,H} - \theta_e) \cdot t$$

Éq. (3.60)

$$H_{vs,adj,c} = f_{vs} \cdot H_{vs,adj} \rightarrow Q_{vs,m} = H_{vs,adj,c} \cdot (\theta_{int,sec,H} - \theta_e) \cdot t$$

Éq. (3.61)

$$Q_{gn} = f_{int} \cdot Q_{int,m} + f_{sol} \cdot Q_{sol,m}$$

Éq. (3.62)

où, $H_{tr,adj,c}$ est le coefficient de transfert thermique par transmission ajusté ; f_{tr} est le facteur de correction du transfert thermique par transmission ; $H_{vs,adj,c}$ est le transfert thermique par renouvellement d'air ajusté ; f_{vs} est le facteur de correction du transfert thermique par renouvellement d'air ; f_{int} est le coefficient de correction des apports de chaleur internes ; et f_{sol} est le facteur de correction des apports solaires, exception faite du rayonnement thermique vers le ciel. Il est à noter que des facteurs de correction distincts ont été étalonnés pour chaque région climatique.

Outre les facteurs de correction précédemment mentionnés pour les quatre composants du transfert thermique, les paramètres sans dimension a_{H0} , τ_{H0} , a_{C0} et τ_{C0} , ont également été étalonnés pour chaque région climatique.

Étant donné que l'algorithme mensuel vise à prévoir les besoins énergétiques des bâtiments au lieu de se concentrer uniquement sur un compartiment du bâtiment comme le recommande la norme EN 15265 (2007), tous les essais de calibration ont été réalisés à partir d'un nouvel ensemble de cas d'étude basés sur les caractéristiques typiques du bâtiment (appartement) comme le montre la Fig. 3.15.

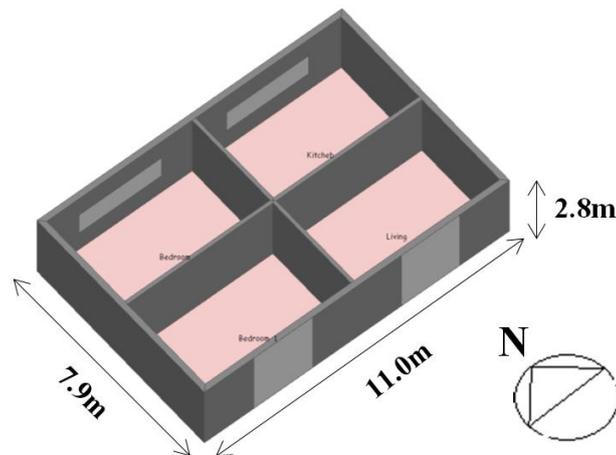


Fig. 3.15: Exemple d'un modèle de bâtiment utilisé dans les cas d'étude pour l'étalonnage de l'algorithme mensuel.

Ces cas d'étude utilisent les mêmes propriétés thermiques que l'enveloppe des cas d'étude de la norme EN 15265 (2007) (voir Tableau 3.22), mais avec des conditions limites différentes (murs et toit non-adiabatiques) et une surface de plancher plus importante (79,2 m²). Le débit d'air supposé est de 1,0 renouvellement d'air par heure (constant).

Tableau 3.22 – Propriétés thermiques de l'enveloppe des cas d'étude pour l'étalonnage

Élément	Valeur U (W/m ² .K)	κ_m [J/m ² .K]
Mur extérieur	0,493	81297
Mur intérieur	-	9146
Toit	0,243	6697
Dalle de sol	-	63380

Les modèles de calibration ont fait l'objet d'une modification importante concernant l'horaire d'occupation et de fonctionnement des systèmes, les cas d'étude de la norme EN 15265 (2007) portant notamment sur des zones de bureaux. Dès lors, les horaires d'occupation et les flux thermiques pour les bâtiments résidentiels tels que présentés précédemment au Tableau 3.13 ont été extraits de la norme ISO 13790 (2008).

Compte tenu de l'importance des surfaces vitrées pour les apports solaires et les déperditions de chaleur par transmission, différents ratios mur/surface de plancher ont été étudiés et sont repris au Tableau 3.23. La présence ou non de stores a par ailleurs été prise en compte dans le cadre de l'étalonnage.

Tableau 3.23 – Principales variables des cas d'étude utilisés pour étalonner l'outil

Cas d'étude	GFR [%]	NGWR [%]	SGWR [%]	Stores
T1	35	36	54	ON
T2				OFF
T3	25	20	40	ON
T4				OFF
T5	15	12	24	ON
T6				OFF

GFR : ratio vitrage/plancher ;
 NGWR : ratio vitrage orienté au nord/mur ;
 SGWR : ratio vitrage orienté au sud/mur.

Tous les cas d'étude ont été réalisés dans cinq régions climatiques différentes : i) Csa; ii) Csb; iii) Cfb; iv) Dfb; et v) Dfc. Les facteurs de correction ont été obtenus en réduisant l'erreur au minimum pour chaque sous-ensemble de cas d'étude de chacune des régions climatiques qui, pour certains, comptaient 500 cas. La Fig. 3.16 montre les améliorations de l'exactitude avec et sans les facteurs de correction pour la région climatique Dfb et plus précisément des améliorations moyennes allant de 43% d'erreur absolue à moins de 2%.

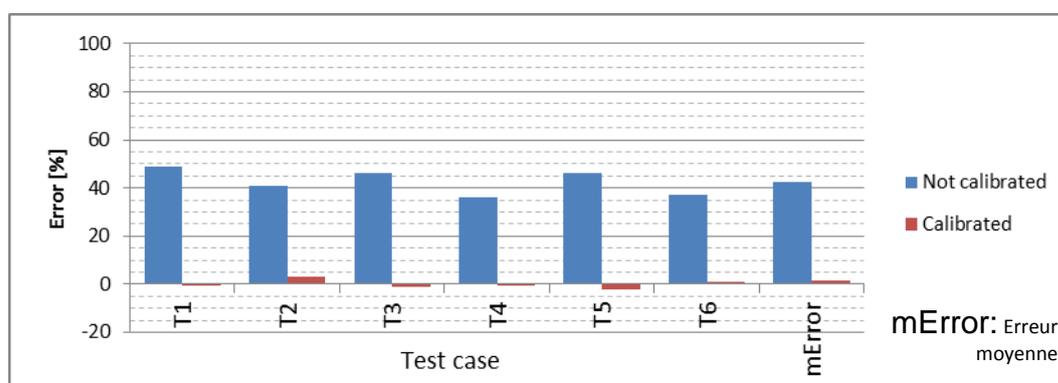


Fig. 3.16: Amélioration de la précision de la méthode mensuelle de la norme ISO 13790 pour la région climatique Dfb: consommation énergétique annuelle totale pour le chauffage et le refroidissement des locaux.

La Fig. 3.17 résume les améliorations pour les cinq régions climatiques dont il est ici question. Il est intéressant de noter qu'en l'absence de corrections, la méthode est moins précise pour les climats plus froids, l'erreur la plus importante étant constatée pour la région climatique Dfc et la moins importante pour la région climatique Csb. La méthode mensuelle s'est avérée moins précise pour l'estimation des besoins énergétiques des mois les plus froids ; en effet, les comparaisons avec la méthode dynamique ont montré que les apports sont utilisés plus efficacement que ne l'a estimé la méthode simplifiée. Cet effet d'autant plus important et évident lorsque les gains solaires sont moins importants.

Globalement, lorsque les facteurs de correction sont appliqués, toutes les erreurs sont inférieures à 10%.

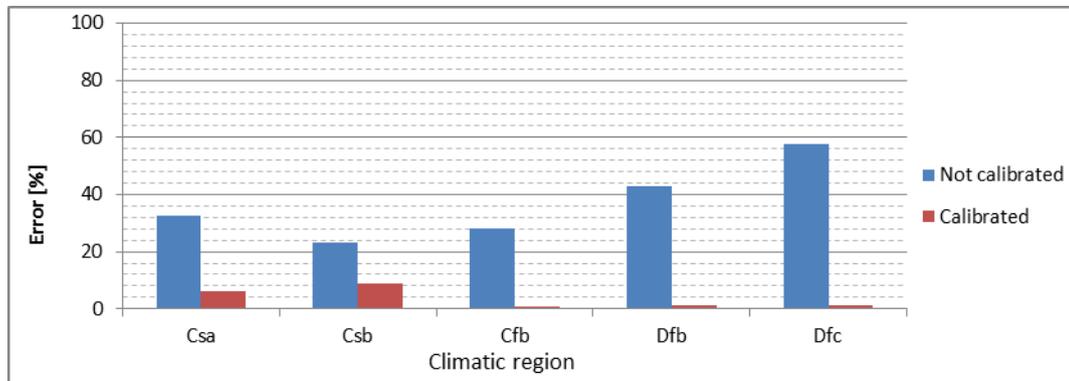


Fig. 3.17: Erreur moyenne de la méthode mensuelle avec et sans les facteurs de calibration

Il est à noter que les erreurs ont évolué différemment avec et sans les stores. Dès lors, les facteurs de calibration ont été traités séparément pour ces deux cas de figure. Le Tableau 3.24 et le Tableau 3.25 présentent les divers facteurs de correction, traités séparément en fonction de l'utilisation ou non de dispositifs d'ombrage amovibles.

Tableau 3.24 – Facteurs de calibration obtenus en cas d'activation des dispositifs de protection solaire

Dispositifs d'ombrage ON												
Région	Mode de chauffage						Mode de refroidissement					
	a_{H0}	τ_{H0}	Q_{tr}	Q_{ve}	Q_{sol}	Q_{int}	a_{C0}	τ_{C0}	Q_{tr}	Q_{ve}	Q_{sol}	Q_{int}
Csa	1,00	15,67	1,00	1,00	0,90	0,93	1,20	15,00	1,07	1,00	0,83	0,90
Csb	1,33	15,00	1,00	1,07	0,97	0,93	1,10	15,00	1,03	1,10	0,97	1,00
Cfb	1,33	15,00	0,93	0,83	1,10	1,07	1,30	15,00	1,00	1,00	1,00	1,03
Dfb	1,30	14,67	0,83	0,90	1,25	1,25	1,00	15,00	1,07	1,07	0,97	1,00
Dfc	1,25	14,33	0,83	0,83	1,17	1,50	1,00	15,00	1,00	1,00	1,00	1,00

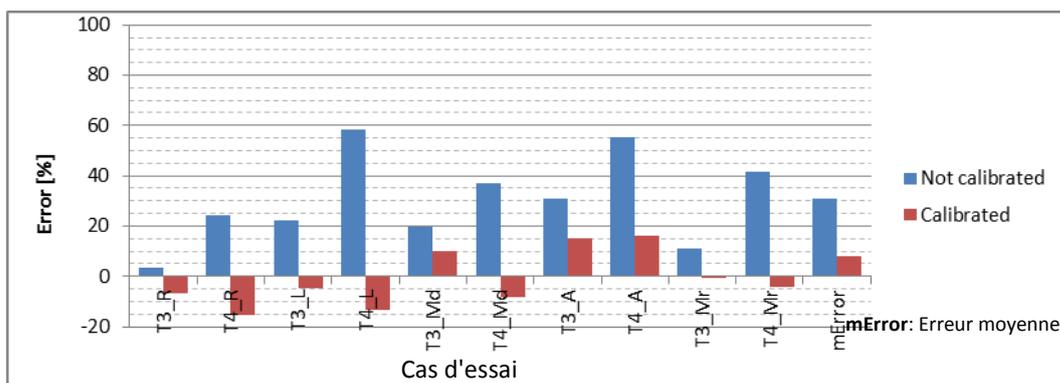
Tableau 3.25 – Facteurs de calibration obtenus lorsque les dispositifs de protection solaire ne sont pas activés

Dispositifs d'ombrage OFF												
Région	a_{H0}	τ_{H0}	Q_{tr}	Q_{ve}	Q_{sol}	Q_{int}	a_{C0}	τ_{C0}	Q_{tr}	Q_{ve}	Q_{sol}	Q_{int}
Csa	0,93	15,00	1,00	1,00	1,03	1,03	1,25	15,00	1,17	1,33	0,83	0,90
Csb	1,13	15,00	1,00	0,97	1,03	1,00	0,93	15,00	1,08	1,17	0,87	0,87
Cfb	1,17	15,00	1,00	0,93	1,00	1,03	1,08	15,00	1,08	1,33	0,90	0,87
Dfb	1,33	15,00	0,93	0,87	1,17	1,10	1,20	15,00	1,00	1,00	0,83	0,90

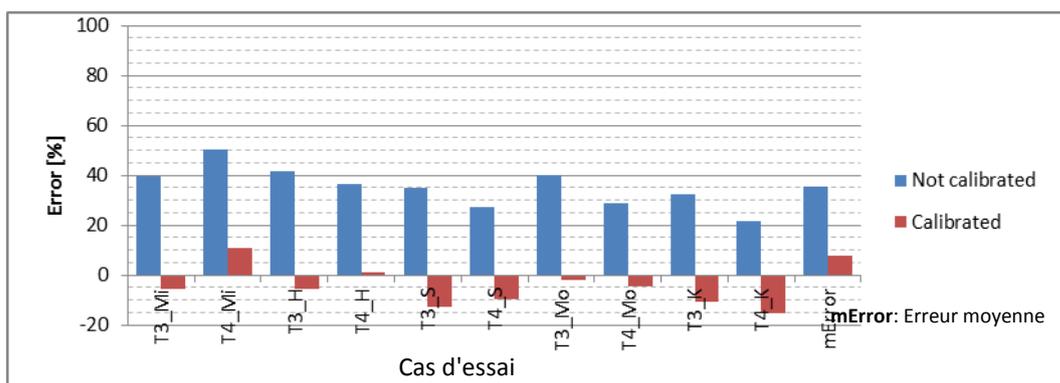
Dfc	1,50	14,00	0,80	0,80	1,07	1,20	1,00	15,00	1,17	1,17	0,92	0,90
------------	------	-------	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	------

Étant donné que l'algorithme mensuel permet de considérer différents modes d'activation des dispositifs d'ombrage en hiver et en été, les facteurs de calibration du Tableau 3.24 ont été appliqués au mode de refroidissement et ceux du Tableau 3.25 au mode de chauffage.

Les facteurs de calibration appliqués dans les cas d'étude 3 et 4 (ratio vitrage/plancher de 25%, Tableau 3.23) dans cinq villes des régions climatiques Csa et Dfb, afin d'évaluer l'erreur résultant de l'utilisation du climat de chacun de ces lieux. La Fig. 3.18 montre que l'erreur occasionnée varie comme prévu en fonction du lieu. Les erreurs les plus importantes concernent les villes d'Athènes (16,2%) et de Kiev (15,5%), respectivement pour les régions climatiques Csa et Dfb. L'erreur moyenne est néanmoins inférieure à 10% pour les deux régions climatiques (Csa: 8,2% et Dfb: 7,9%).



a) R: Rome; L: Lisbonne; Md: Madrid; A: Athènes; Mr: Marseille



b) Mi: Minsk; H: Helsinki; S: Stockholm; Mo: Moscou; K: Kiev

Fig. 3.18: Vérification de la précision de l'étalonnage pour diverses villes des régions climatiques :
a) Csa; b) Dfb.

4 VALIDATION DES MÉTHODOLOGIES ADOPTÉES

Il est ici question de la validation des méthodes adoptées décrites dans les rubriques précédentes. Dans les deux cas, une étude de cas est réalisée en appliquant la méthode simplifiée et les résultats sont comparés à ceux d'une méthode avancée. Les analyses avancées sont effectuées à l'aide du logiciel commercial *GaBi 6* (2012) et *DesignBuilder* (2012), respectivement pour l'analyse du cycle de vie et la quantification d'énergie.

4.1 Validation de la méthode des macro-composants

La méthode des macro-composants est validée sur base d'une étude de cas concernant un bâtiment résidentiel bas au Portugal. Les résultats obtenus par l'approche adoptée sont comparés à ceux de l'analyse avancée effectuée avec le logiciel GaBi. L'analyse est réalisée au niveau du bâtiment.

4.1.1 Description de l'étude de cas

Le bâtiment est une résidence unifamiliale à deux étages située à Coimbra (Portugal). Les plans horizontaux et les façades du bâtiment sont illustrés respectivement à la Fig. 4.1 et à la Fig. 4.2.



Fig. 4.1: Façades du bâtiment

La superficie de construction totale est d'environ 202,00 m², avec 100,8 m² au rez-de-chaussée et 100,8 m² au premier étage (20,2 m² de terrasse). Le bâtiment a une hauteur totale de 6 m.

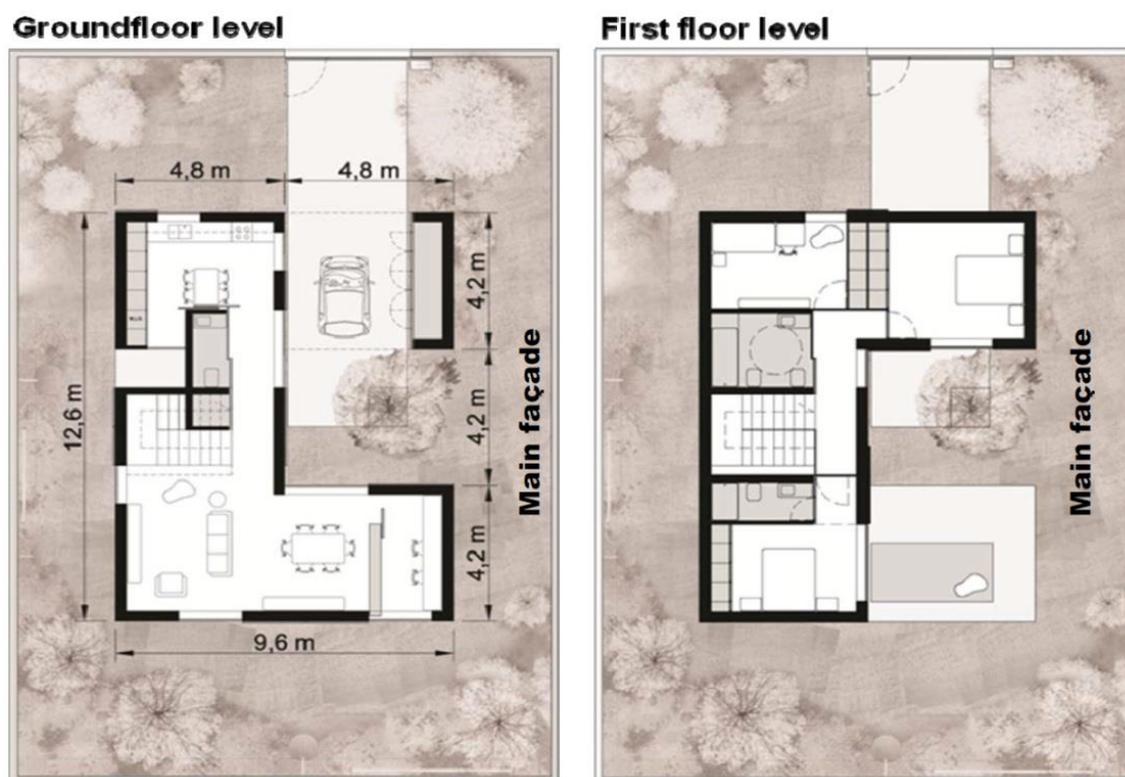


Fig. 4.2: Étages du bâtiment

Les surfaces vitrées de chaque façade sont également indiquées sur les plans du bâtiment. Le Tableau 4.1 résume les parties de l'enveloppe du bâtiment.

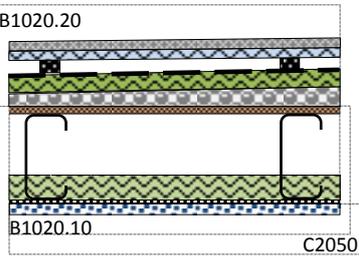
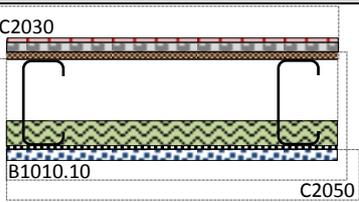
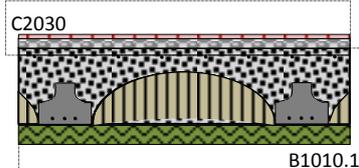
Tableau 4.1: Murs et surfaces vitrées au stade préliminaire

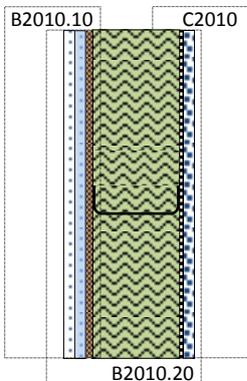
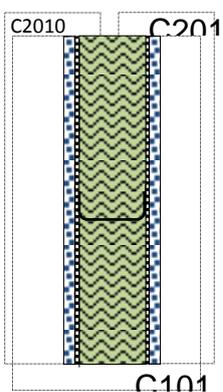
	Nord [m ²]	Est [m ²]	Sud [m ²]	Ouest [m ²]	Somme [m ²]
Murs	41,3	49,9	38,3	60,4	189,9
Vitrage	13,0	17,3	15,6	4,3	50,2

4.1.2 Sélection des macro-composants

Afin de pouvoir réaliser l'analyse du cycle de vie du bâtiment, des macro-composants sont sélectionnés pour les principaux composants du bâtiment, à savoir la superstructure, l'enceinte verticale extérieure et les intérieurs, qui sont repris au Tableau 4.2.

Tableau 4.2: Sélection des macro-composants

	Référence du macro-composant	Couches de matériau	Épaisseur [mm] Densité [kg/m ²]	Valeur U [W/m ² .K]	K _m [J/m ² .K]
Enveloppe					
	B1020.20 Platelage de toit tablier, dalles et coffrage	Dalle de béton	30 mm	0,37(*)	13435
		Dalle XPS	30 mm		
		Cavité d'air	30 mm		
		Film imperméable	1,63 kg/m ²		
		XPS	0 mm		
		Revêtement de béton	40 mm		
	Toit ossature porteuse	OSB	18 mm		
		Cavité d'air	80 mm		
		Laine de roche	120 mm		
		Acier léger	17 kg/m ²		
C2050 Finitions de plafond	Panneau de gypse	15 mm			
	Peintures	0,125 kg/m ²			
Plancher intérieur					
	C2030 Revêtements de sol	Carreaux de céramique	31 kg/m ²	-	61062
		Revêtement de béton	13 mm		
	Plancher ossature porteuse	OSB	18 mm		
		Cavité d'air	160 mm		
		Laine de roche	40 mm		
		Acier léger	14 kg/m ²		
		Panneau de gypse	15 mm		
	C2050 Finitions de plafond	Peintures	0,125 kg/m ²		
Dalle de sol					
	C2030 Revêtements de sol	Carreaux de céramique	31 kg/m ²	0,599	65957
		Revêtement de béton	13 mm		
	Plancher ossature porteuse	Béton préfabriqué dalle	180 mm		
		XPS	40 mm		

Mur extérieur					
	B2010.10 Placage pour mur extérieur	ETICS	13,8 kg/m ²	0,29 ^(*)	13391
	B2010.20 Construction du mur extérieur	OSB	13 mm		
		Laine de roche	120 mm		
		Acier léger	15 kg/m ²		
	Panneau de gypse	15 mm			
C2010 Finitions de mur intérieur	Peintures	0,125 kg/m ²			
Mur intérieur					
	C2010 Finitions de mur intérieur	Peintures	0,125 kg/m ²	-	26782
	C1010 Intérieur cloisons	Panneau de gypse	15 mm		
		Laine de roche	60 mm		
		Acier léger	10 kg/m ²		
	Panneau de gypse	15 mm			
C2010 Finitions de mur intérieur	Peintures	0,125 kg/m ²			

(*) Valeurs corrigées pour les ponts thermiques

4.1.3 Application de la méthode des macro-composants

En fonction de la géométrie du bâtiment et en utilisant les macro-composants sélectionnés (indiqués au Tableau 4.2), les calculs environnementaux sont effectués pour tout le bâtiment et pour une durée de vie de 50 ans. Les résultats sont indiqués à la Fig. 4.3, compte tenu des modules définis dans la norme EN 15978. Ce graphique représente la contribution de chaque module par catégorie d'impact. Comme le montre ce graphique, la phase de production des matériaux (modules A1-A3) contribue plus que toutes les autres catégories d'impact (avec des contributions de plus de 60%).

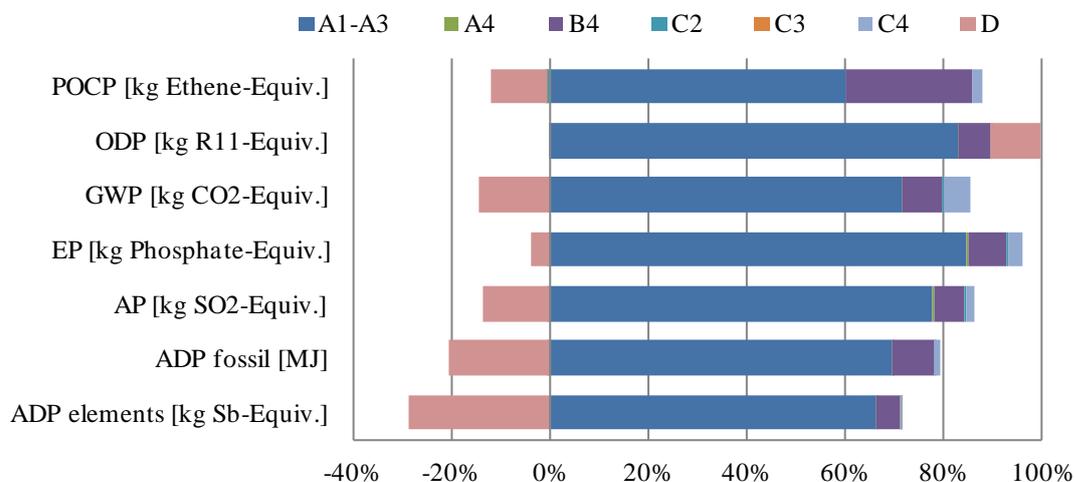


Fig. 4.3: Contribution de chaque module par catégorie environnementale

La phase d'exploitation (module B4) ainsi que le recyclage et la récupération de matériaux (module D) contribuent largement à la plupart des catégories d'impact, suivis de la phase de démolition (modules C2 – C4). La Fig. 4.3 indique que des valeurs négatives sont obtenues pour le module D et que des crédits sont octroyés pour cette solution spécifique en raison du recyclage et/ou de la récupération des matériaux après la démolition du bâtiment. Les résultats pour chaque catégorie environnementale sont résumés au Tableau 4.3.

Tableau 4.3: Analyse environnementale du cycle de vie du bâtiment

Catégorie environnementale	TOTAL
ADP-éléments [kg d'équiv. Sb]	1.11E-01
ADP-comb. foss. [MJ]	4.38E+05
PA [kg d'équiv. SO2]	1.35E+02
PE [kg d'équiv. phosphate]	1.53E+01
GWP [kg d'équiv. de CO2]	3.54E+04
ODP [kg d'équiv. R11]	1.00E-03
POCP [kg équiv. éthène]	3.71E+01

4.1.4 Comparaison avec une analyse du cycle de vie détaillée

La présente section analyse la maison unifamiliale en fonction des détails du bâtiment et des phases du cycle de vie. L'analyse du cycle de vie ici présentée comble les lacunes de la méthode des macro-composants décrite précédemment, à savoir les fondations du bâtiment et la phase de construction (module A5). L'analyse complète du cycle de vie a été effectuée à l'aide du logiciel *GaBi 6* (2012).

Les fondations du bâtiment sont en béton armé et le premier niveau du bâtiment est élevé d'environ 50 cm par rapport au sol. En fin de vie, le béton armé est recyclé en supposant les mêmes taux de recyclage.

La phase de construction (module A5) est basée sur les tâches suivantes : i) la préparation du terrain (excavation du sol et transport vers le dépôt) et ii) le processus de construction (utilisation du matériel de chantier pour l'assemblage de la structure et d'un chariot élévateur pour lever les panneaux structuraux). La durée de la construction du bâtiment a été estimée à 1 mois et demi.

Les résultats de l'analyse du cycle de vie, compte tenu de toutes les phases de ce dernier, sont présentés à la Fig. 4.4.

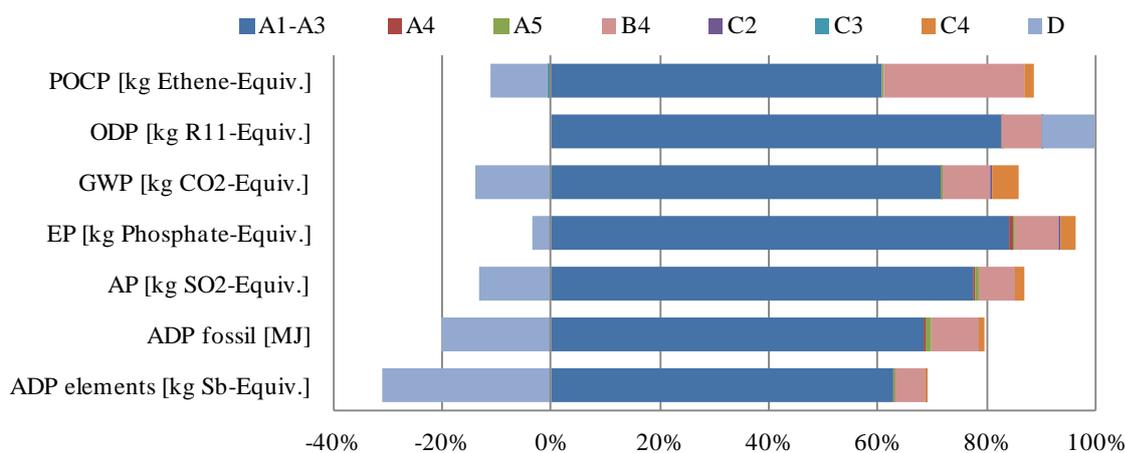


Fig. 4.4: Analyse du cycle de vie de tout le bâtiment

La phase de production des matériaux (modules A1-A3) contribue davantage que toutes les autres catégories d'impact (avec des contributions supérieures à 60%). La contribution de la phase de construction (modules A4-A5) est négligeable, allant de 0% pour les catégories ODP, POCP et ADP_{éléments} à près de 2,1% pour la catégorie environnementale ADP_{combustibles fossiles}. La phase d'exploitation (module B4) ainsi que le recyclage et la récupération de matériaux (module D) contribuent largement à la plupart des catégories d'impact, suivis de la phase de démolition (modules C2 – C4). Ces conclusions ont déjà été tirées pour la méthode simplifiée, malgré ses limites.

Enfin, l'erreur relative dans chaque catégorie d'impact, occasionnée par la méthode simplifiée en ce qui concerne l'analyse complète, est précisée au Tableau 4.4.

Tableau 4.4: Erreur (%) dans chaque catégorie d'impact résultant de l'application de la méthode des macro-composants.

ADP-éléments	ADP-comb. foss.	PA	PE	GWP	ODP	POCP
0,0%	-2,4%	-1,3%	-1,3%	-1,3%	-0,1%	-0,5%

L'erreur est négligeable pour la plupart des catégories environnementales. De toute évidence, la phase de construction peut être plus adéquate en recourant à d'autres systèmes de construction.

Dès lors, malgré les limites de la méthode des macro-composants, les résultats de la méthodologie proposée sont cohérents par rapport à ceux de l'analyse détaillée du cycle de vie.

4.2 Validation de la méthode pour le calcul des besoins énergétiques

La validation de la méthode adoptée pour les calculs des besoins énergétiques repose sur la même étude de cas. Les sections qui suivent décrivent toutes les données d'entrée complémentaires et la procédure de calcul.

Les résultats de l'approche adoptée sont comparés à ceux d'une analyse dynamique avancée réalisée à l'aide du programme *DesignBuilder/EnergyPlus* (2012).

4.2.1 Données climatiques et caractéristiques thermiques du sol

Le bâtiment se situe à Coimbra, dans la région climatique Csb. Les valeurs mensuelles respectives de la température de l'air et du rayonnement solaire global sont présentées à la Fig. 4.5.

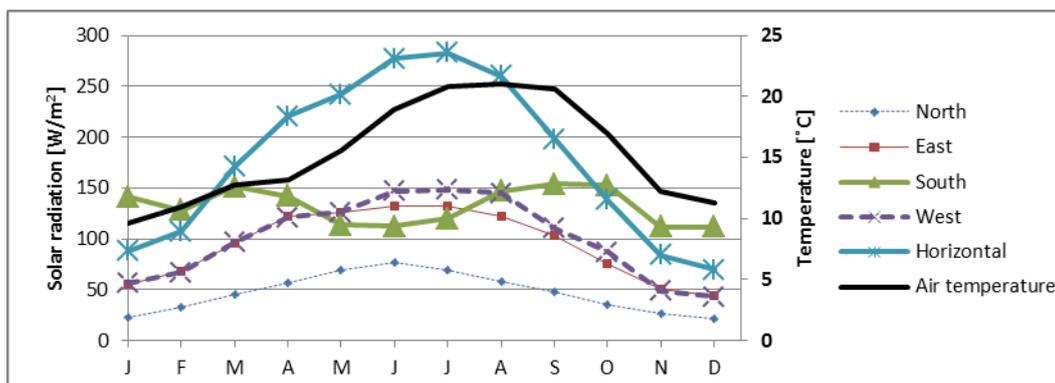


Fig. 4.5: Données climatiques de Coimbra: rayonnement solaire et température de l'air extérieur

Les caractéristiques thermiques du sol précisées au Tableau 3.10 ont été considérées par défaut.

4.2.2 Données relatives à l'occupation

Pour l'horaire d'occupation et le flux thermique résultant des charges internes (activité des occupants, électroménager et éclairage), les valeurs par défaut fournies par la norme ISO 13970 et précédemment présentées au Tableau 3.13

ont été prises en compte. Des températures de confort de 20 et 25°C ont été utilisées respectivement pour l'hiver et l'été.

4.2.3 Techniques spéciales du bâtiment

De même, pour les informations techniques et le planning des techniques spéciales du bâtiment (chauffage, refroidissement, renouvellement de l'air et production d'eau chaude sanitaire), les valeurs par défaut indiquées au Tableau 4.5 ont été utilisées.

Tableau 4.5: Données d'entrée des systèmes du bâtiment (valeurs par défaut)

Techniques spéciales du bâtiment	Valeurs
Climatisation (Température de consigne 20°C – 25°C) ⁽¹⁾	COP chauffage = 4,0 COP refroidissement = 4,0
Production d'eau chaude sanitaire ²	Rendement : 0,9
Ventilation + taux d'infiltration ⁽³⁾ (Valeurs constantes)	0,6 ac/h (mode de chauffage) 1.2 ac/h (mode de refroidissement)

(1) extrait de la norme ISO13790 (2008) – Tableau G.12 ;

(2) conformément à la norme EN 15316-3-1 (2007) ;

(3) dépend de l'étanchéité de l'air de l'enveloppe du bâtiment et des stratégies de refroidissement passif.

4.2.4 Enveloppe vitrée et spécifications fonctionnelles relatives à l'ombrage

Les caractéristiques et propriétés des éléments vitrés sont précisées au Tableau 4.6. Dans le cas présent, il a été tenu compte d'un double vitrage avec châssis en PVC.

Tableau 4.6: Propriétés thermiques et optiques du vitrage (verre + châssis)

Matériaux	Valeur U (W/m ² .K)	CARS
Châssis en PVC et double vitrage (8+6 mm, avec un espace d'air de 14 mm)	2,597	0,780

Les propriétés thermiques des dispositifs d'ombrage sont extraites du Tableau 4.7.

Tableau 4.7: Propriétés thermiques et optiques des dispositifs d'ombrage

Élément	Transmission solaire	Réflectance solaire	R [m ² .K/W]	g _{gl+sh}
Fermetures	0,02	0,80	0,260*	0,04**

*fermeture et espace d'air inclus (ISO 10077, 2006) ; **EN 13363-1, 2007.

4.2.5 Enveloppe opaque

Les caractéristiques et propriétés des éléments opaques des façades sont extraites des macro-composants (voir Tableau 4.2).

La couleur de l'enveloppe opaque extérieure du bâtiment a une incidence sur les apports solaires. Il a été considéré que le bâtiment a une couleur claire avec un coefficient d'absorption de 0,4.

4.2.6 Résultats de la performance énergétique du bâtiment

Dans le cas présent, le besoin énergétique, respectivement pour le chauffage et le refroidissement des locaux, est de 651,3 kWh et 2195,0 kWh par an et est calculé à l'aide de l'algorithme mensuel. Dès lors, le besoin énergétique annuel pour le chauffage et le refroidissement des locaux est de 2846,3 kWh (23,0 kWh/m²) et de 2642 kWh (21,3 kWh/m²) pour la production d'eau chaude sanitaire.

Les besoins énergétiques mensuels pour le refroidissement et le chauffage des locaux sont indiqués à la Fig. 4.6.

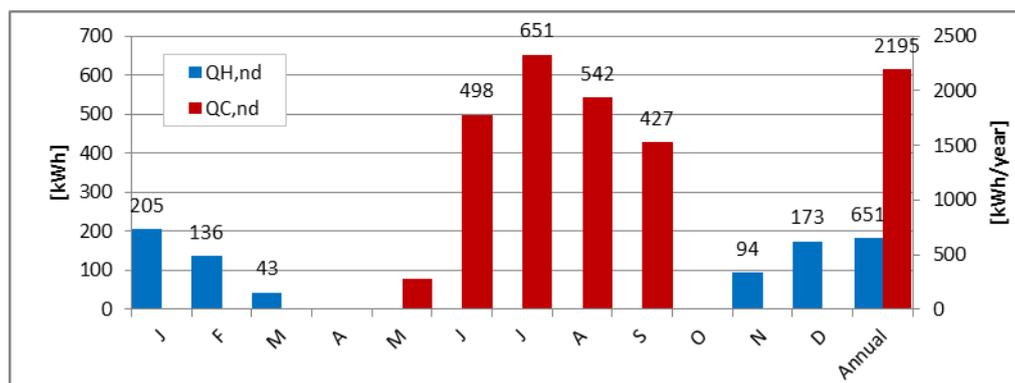


Fig. 4.6: Besoins énergétiques pour le chauffage et le refroidissement des locaux (algorithme mensuel)

4.2.7 Comparaison avec la simulation numérique avancée

Les résultats de l'algorithme mensuel et ceux des simulations dynamiques avancées ont été comparés afin d'évaluer la pertinence des résultats de l'algorithme mensuel.

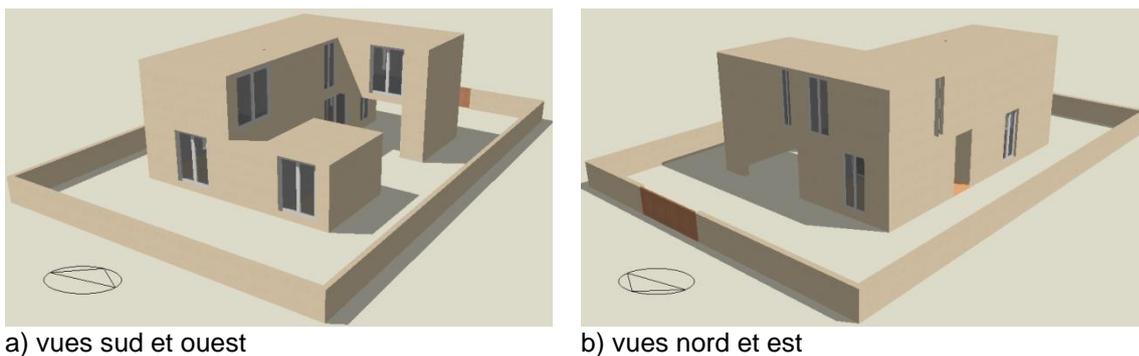
4.2.7.1 Modèle de simulation dynamique

La simulation dynamique avancée du comportement thermique du bâtiment a été réalisée à l'aide du logiciel DesignBuilder (2012). La source des données météorologiques utilisée pour la simulation était la même que celle de la méthode simplifiée. Toutefois, dans le cas présent, des valeurs horaires ont été utilisées pour tous les paramètres météorologiques, en lieu et place des valeurs

mensuelles relatives à la température du thermomètre sec et au rayonnement solaire.

La modélisation avancée en trois dimensions permet de simuler la totalité de l'architecture du bâtiment illustré à la Fig. 4.1 et à la Fig. 4.2. La Fig. 4.7 présente deux plans d'élévation extérieurs du modèle DesignBuilder utilisé dans la simulation dynamique. Le modèle du bâtiment a été élaboré à partir de dix zones thermiques différentes, correspondant aux subdivisions internes du bâtiment (Fig. 4.8) :

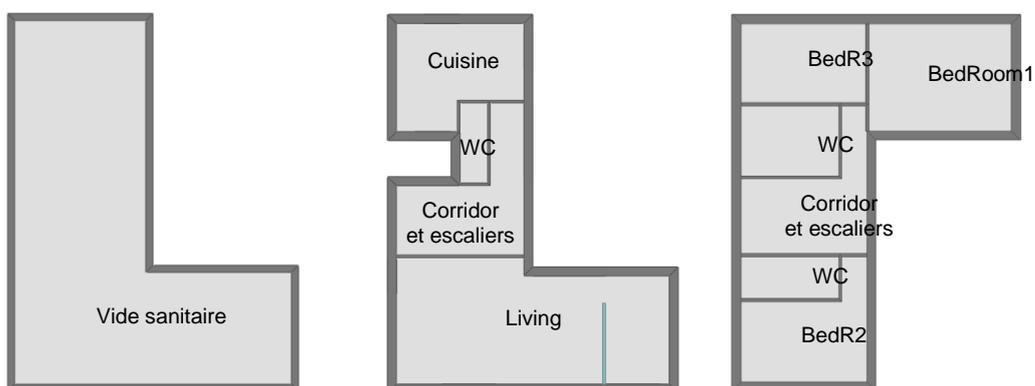
- (i) Le vide-sanitaire au sous-sol a été modélisé comme un espace non climatisé ;
- (ii) Le rez-de-chaussée, comportant trois zones thermiques ;
- (iii) Le premier étage avec cinq zones ;
- (iv) L'espace commun aux deux niveaux, incluant les corridors et la cage d'escaliers.



a) vues sud et ouest

b) vues nord et est

Fig. 4.7 : Plans d'élévation du modèle du bâtiment



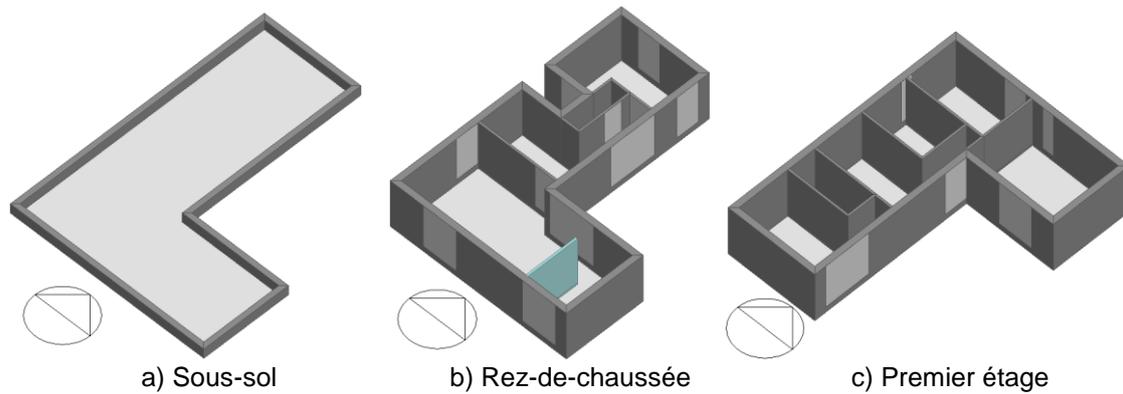


Fig. 4.8 : Agencement des étages

Les éléments de construction pris en compte dans le modèle sont les mêmes que ceux décrits précédemment pour la méthode des macro-composants (voir Tableau 4.2, Tableau 4.6 et Tableau 4.7, respectivement pour les dispositifs de protection solaire opaques et avec composants vitrés). De même, une stratégie similaire a été considérée pour le contrôle de l'ombrage des fenêtres. De plus, l'horaire d'occupation, les taux de renouvellement d'air et d'infiltration, le rendement et le plan d'utilisation du matériel de climatisation sont extraits de l'analyse précédente. Une comparaison graphique entre les besoins énergétiques mensuels et annuels pour le chauffage et le refroidissement, calculés à partir des deux méthodes, est présentée à la Fig. 4.9. Les besoins énergétiques annuels pour le chauffage et le refroidissement des locaux, déterminés sur base de simulations dynamiques, sont respectivement de 932,4 kWh et de 2133,3 kWh. Il en résulte une consommation énergétique totale de 3065,7 kWh par an ($24,8 \text{ kWh/m}^2$).

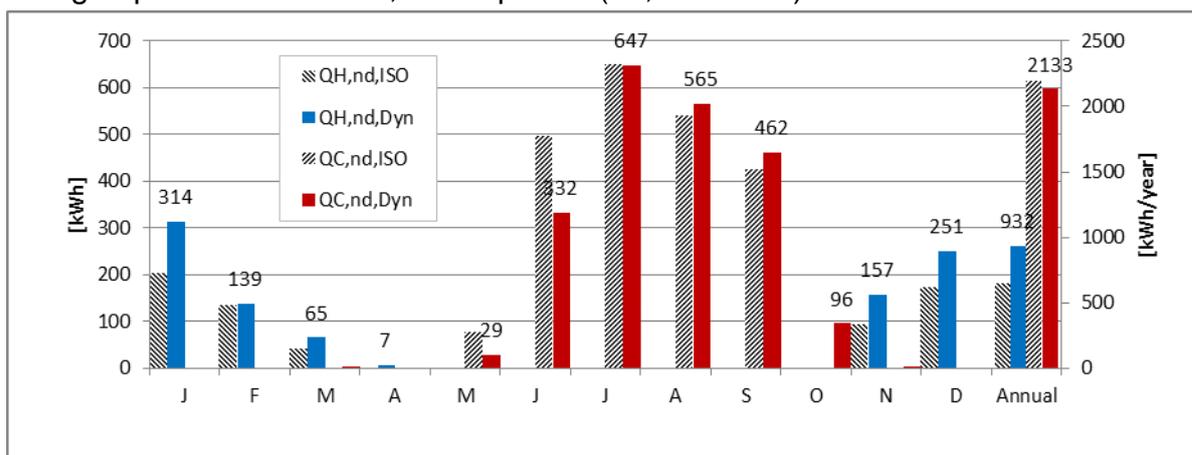


Fig. 4.9: Besoins énergétiques du bâtiment pour le refroidissement et le chauffage des locaux: simulations dynamiques (Dyn) versus algorithme mensuel (ISO)

Comme le montre la Fig. 4.9, les besoins énergétiques calculés à l'aide de la méthode simplifiée (méthode mensuelle) concordent bien avec les résultats

obtenus par les calculs dynamiques. La comparaison des besoins énergétiques totaux (chauffage et refroidissement) de la phase avancée (2846,3 kWh/an) avec les calculs dynamiques laisse apparaître une erreur de -7,2%.

4.3

REMARQUES FINALES

Les deux approches simplifiées présentées dans ce document évitent de devoir recourir à des outils complexes tels que l'ACV, laquelle nécessite souvent une certaine expertise dans le domaine et permet de considérablement réduire les délais de réalisation habituels d'une telle analyse.

Les deux méthodes ont été validées sur base de la comparaison avec les analyses avancées effectuées à l'aide des logiciels commerciaux *GaBi 6* (2012) et *DesignBuilder* (2012), respectivement pour l'analyse du cycle de vie et l'évaluation des besoins énergétiques.

La comparaison des résultats des deux types d'analyse permet de conclure que la précision des deux méthodes est acceptable.

RÉFÉRENCES

Blendspace <https://www.blendspace.com/lessons/hMYwDSTKeg6ssQ/essential-question-how-can-i-protect-this-environment> (consulté pour la dernière fois en 2013).

Construction Product Association, "A guide to understanding the embodied impacts of construction products" [ISBN 978-0-9567726-6-4]

DesignBuilder software v3.0.0.105, www.designbuilder.co.uk/, 2012

EERE-USDoE, Energy Efficiency and Renewable Energy Website from the United States Department of Energy: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data2.cfm/region=6_europe_wmo_region_6 (consulté pour la dernière fois en mars 2014)

EN 13363-1. (2007). Dispositifs de protection solaire combinés à des vitrages - Partie 1: Méthode simplifiée, CEN - Comité européen de normalisation.

EN 15193 (2007), Performances thermiques des bâtiments - Exigences énergétiques pour l'éclairage, CEN – Comité européen de normalisation.

EN 15265 (2007), Performances thermiques des bâtiments — Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des locaux — Critères généraux et procédures de validation, CEN - Comité européen de normalisation.

EN 15316-3-1 (2007), Systèmes de chauffage dans les bâtiments — Méthode de calcul des exigences énergétiques et des rendements des systèmes – Partie 3.1 Systèmes de production d'eau chaude sanitaire, caractérisation des besoins (exigences relatives au puisage), CEN – Comité européen de normalisation.

EN 15643-1. 2010. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution au développement durable des bâtiments — Partie 1: cadre méthodologique général, Comité européen de normalisation, Bruxelles, Belgique.

EN 15804. 2012. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction, Comité européen de normalisation, Bruxelles, Belgique.

EN 15978. 2011. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul, Comité européen de normalisation, Bruxelles, Belgique.

EN ISO 13786 (2007), Performance thermique des composants de bâtiment — Caractéristiques thermiques dynamiques — Méthodes de calcul, CEN – Comité européen de normalisation.

EN ISO 6946 (2007), Composants et parois de bâtiments — Résistance thermique et coefficient de transmission thermique — Méthode de calcul, CEN – Comité européen de normalisation.

EPA. U.S. Environmental protection Agency, Climate change (<http://www.epa.gov/climatechange/>) (consulté pour la dernière fois le 19/09/2009).

EPD, http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/prob_solutions/images/smog_cause_eng.jpg

Forsberg, A., von Malmborg F, 2004, Tools for environmental assessment of the built environment. Extrait de: Building and Environment, 39, p. 223 à 228.

GaBi 6 (2012), Software-System and Databases for Life Cycle Engineering, Version 5.56, PE International AG, Leinfelden-Echterdingen, Allemagne.

Bases de données GaBi 2006, PE INTERNATIONAL GmbH; LBP-GaBi, Université de Stuttgart: GaBi Software System, Leinfelden-Echterdingen / Allemagne, 2009.

Gervásio, H., Martins, R., Santos, P., Simões da Silva, L., "A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design", *Building and Environment* 73 (2014), p. 256 à 270, Information DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.12.015.

Site Web de *Google Earth*: www.google.co.uk/intl/en_uk/earth/ (consulté pour la dernière fois en janvier 2014).

Gorgolewski, M. (2007) Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing. *Building and Environment*, 42(1), p. 230 à 236.

Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002, 692 pages.

Heijungs. R., Guinée. J., Huppes. G., Lankreijer. R., Udo de Haes. H., Sleeswijk. A., Ansems. A., Egges. P., van Duin. R. and de Goede. H, 1992, Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds, CML, Université de Leiden, Leiden

Howard N, Edwards S et Anderson J., 1999, Methodology for environmental profiles of construction materials, components and buildings, BRE Report BR 370, Watford. (<http://www.bre.co.uk/service.jsp?id=52>)

Huijbregts. M., 2001, Uncertainty and variability in environmental life-cycle assessment. Thèse de doctorat, Université d'Amsterdam, Pays-Bas.

AIE, 2001, LCA methods for buildings. Annex 31 – Energy-related environmental impact of buildings, Agence internationale de l'énergie.

IPCC, 2007, Fourth Assessment Report – Climate Change 2007. IPCC, Genève, Suisse.

ISO 10077 (2006), Performance thermique des fenêtres, portes et fermetures — Calcul du coefficient de transmission thermique - Partie 1: Général, ISO - Organisation internationale de normalisation.

ISO 13370 (2007), Performance thermique des bâtiments — Transfert de chaleur par le sol — Méthodes de calcul, ISO -Organisation internationale de normalisation.

ISO 13789 (2007), Performance thermique des bâtiments — Coefficients de transfert thermique par transmission et par renouvellement d'air — Méthode de calcul, ISO - Organisation internationale de normalisation.

ISO 13790 (2008), Performance énergétique des bâtiments — Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des locaux, CEN – Comité européen de normalisation.

ISO 14025, 2006, Marquages et déclarations environnementaux — Déclarations environnementales de Type III — Principes et modes opératoires.

ISO 14040. 2006, Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre,

Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse.

ISO 14044. 2006, Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre, Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse.

Jönsson Á., 2000, Tools and methods for environmental assessment of building products - methodological analysis of six selected approaches. Extrait de: *Building and Environment*, 35, p. 223 à 238.

Kellenberger D., 2005, Comparison and benchmarking of LCA-based building related environmental assessment and design tools, EMPA Dübendorf, Technology and Society Laboratory, LCA group.

Kortman J, van Ewijk H, Mark J, Anink D, Knapen M., 1998, Presentation of tests by architects of the LCA-based computer tool EcoQuantum domestic, Proceedings of Green Building Challenge 1998, Vancouver, Canada (<http://www.ivambv.uva.nl/uk/producten/product7.htm>)

Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B et Rubel F (2006) World map of Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3): p. 259 à 263.

LCI, 2001, World Steel Life Cycle Inventory, Methodology report 1999/2000. Institut international du fer et de l'acier, Comité des affaires environnementales, Bruxelles.

Lippiatt, B. 2002. Building for environmental and economical sustainability, Technical manual and user guide (BEES 3.0), National Institute of Standards and Technology (NIST), Report NISTIR 6916. (<http://www.bfrl.nist.gov/oea/software/bees.html>).

RCCTE (2006), Portuguese code of practice for thermal behaviour and energy efficiency of residential buildings, Decreto-Lei n.80/2006, Regulamento das Características Térmicas dos Edifícios (en portugais:), Lisbonne, Portugal: Diário da República.

Reijnders L., van Roekel A., 1999, Comprehensiveness and adequacy of tools for the environmental improvement of buildings, Extrait de: *Journal of Cleaner Production*, 7, p. 221 à 225.

Santos P., Gervásio H., Simões da Silva L., et Gameiro A. (2011), Influence of climate change on the energy efficiency of light-weight steel residential buildings, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 28, p. 325 à 352.

Santos P., Simões da Silva L., et Ungureanu V., 2012, *Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings*, Convention européenne de la construction métallique (CECM), Comité technique 14 - Sustainability & Eco-Efficiency of Steel Construction, ISBN 978-92-9147-105-8, N. 129, 1re édition.

SB_Steel, 2014, Sustainable Building Project in Steel, Projet de rapport final, RFSR-CT-2010-00027, Programme de recherche du Fonds de Recherche du Charbon et de l'Acier.

Institut du recyclage de l'acier, <http://www.recycle-steel.org/construction.html> (consulté pour la dernière fois le 31/08/2009)

The energy library. <http://theenergylibrary.com/node/324>

Trusty WB, Associates, 1997, Research guidelines, ATHENATM Sustainable Materials Institute, Merrickville, Canada (<http://www.athenasmi.ca/about/lcaModel.html>)

PNUE, 2004, Why take a life cycle approach?, Publication des Nations Unies, ISBN: 92-807-24500-9.

UniFormat™: A Uniform Classification of Construction Systems and Assemblies (2010), The Construction Specification Institute (CSI), Alexandria, VA, and Construction Specifications Canada (CSC), Toronto, Ontario, ISBN 978-0-9845357-1-2.

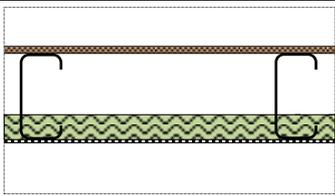
Werner, F., 2005, Ambiguities in decision-oriented life cycle inventories – The role of mental models and values, Doi 10.1007/1-4020-3254-4, Springer, Pays-Bas.

Wikipedia, 2013a, http://en.wikipedia.org/wiki/Marine_pollution.

Wikipedia, 2013b, http://en.wikipedia.org/wiki/Natural_resource.

Worldsteel organization, <http://www.worldsteel.org/index.php> (consulté pour la dernière fois le 31/08/2009).

APPENDICE 1 – BASE DE DONNÉES DES MACRO-COMPOSANTS

B1010.10 Ossature de plancher						
	B1010.10.1a	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)	
		OSB (mm)	18	Incinération	80	
		Cavité d'air (mm)	160			
		Laine de roche (mm)	40	Recyclage	80	
		Panneau de gypse (mm)	15	Recyclage	80	
		Acier léger (kg/m ²)	14	Recyclage	90	
B1010.10.1a - ACV						
		A1-A3	A4	C2	C4	D
	ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,83E-05	1,76E-09	1,54E-09	3,37E-08	-1,96E-04
	ADP fossile [MJ]	5,48E+02	6,54E-01	5,72E-01	1,31E+00	-3,35E+02
	AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,70E-01	2,11E-04	1,83E-04	5,74E-04	-4,45E-02
	EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,41E-02	4,86E-05	4,20E-05	8,79E-05	-1,01E-03
	GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	5,12E+01	4,71E-02	4,12E-02	3,86E-01	-1,46E+01
	ODP [kg R11-Equiv.]	7,65E-07	8,25E-13	7,21E-13	7,21E-11	1,76E-07
	POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,53E-02	-6,89E-05	-5,95E-05	1,49E-04	-1,07E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurelle d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :**Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3**

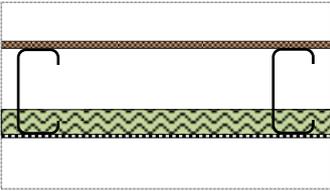
Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
OSB	PE International	Allemagne	2008
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
Acier léger	Worldsteel	Monde	2007
Laine de roche	PE International	Europe	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération OSB	PE International	Allemagne	2008
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B1010.10 Ossature de plancher				
B1010.10.1b	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	OSB (mm)	18	Incinération	80
	Cavité d'air (mm)	160	-	-
	EPS (mm)	40	Incinération	80
	Panneau de gypse (mm)	15	Recyclage	80
	Acier léger (kg/m ²)	14	Recyclage	90

B1010.10.1b - ACV					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,75E-05	1,53E-09	1,34E-09	3,80E-08	-1,96E-04
ADP fossile [MJ]	5,36E+02	5,70E-01	5,00E-01	1,37E+00	-3,57E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,30E-01	1,84E-04	1,60E-04	6,24E-04	-5,26E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	9,54E-03	4,24E-05	3,68E-05	1,00E-04	-1,48E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	4,68E+01	4,11E-02	3,60E-02	2,48E+00	-1,63E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	8,21E-07	7,19E-13	6,31E-13	6,98E-11	1,76E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	3,55E-02	-6,01E-05	-5,20E-05	1,42E-04	-1,12E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurale d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé - ACV	Source de données	Couverture géographique	Date
OSB	PE International	Allemagne	2008
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
Acier léger	Worldsteel	Monde	2007
PSE	PE International	Europe	2011

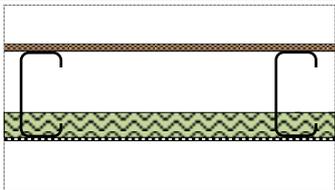
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération OSB	PE International	Allemagne	2008
Incinération EPS	PE International	Europe	2011
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B1010.10 Ossature de plancher

B1010.10.1c	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	OSB (mm)	18	Incinération	80
	Cavité d'air (mm)	160		
	XPS (mm)	40	Incinération	80
	Panneau de gypse (mm)	15	Recyclage	80
	Acier léger (kg/m ²)	14	Recyclage	90

B1010.10.1c - ACV

	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,81E-05	1,56E-09	1,37E-09	4,42E-08	-1,96E-04
ADP fossile [MJ]	5,75E+02	5,78E-01	5,07E-01	1,54E+00	-3,70E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,33E-01	1,87E-04	1,62E-04	7,16E-04	-5,74E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	9,73E-03	4,30E-05	3,73E-05	1,17E-04	-1,77E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	4,79E+01	4,16E-02	3,65E-02	3,78E+00	-1,72E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	7,64E-07	7,29E-13	6,40E-13	7,61E-11	1,75E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,49E-02	-6,09E-05	-5,28E-05	1,54E-04	-1,15E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurelle d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
OSB	PE International	Allemagne	2008
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008

Acier léger	Worldsteel	Monde	2007
XPS	PE International	Allemagne	2011

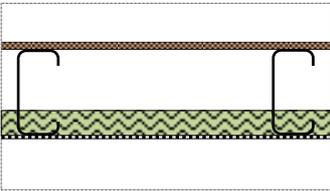
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération OSB	PE International	Allemagne	2008
Incinération XPS	PE International	Europe	2011
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B1010.10 Ossature de plancher

B1010.10.1d	Matériaux	Épaisseur/ densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	OSB (mm)	18	Incinération	80
	Cavité d'air (mm)	160		
	PUR (mm)	40	Incinération	80
	Panneau de gypse (mm)	15	Recyclage	80
	Acier léger (kg/m ²)	14	Recyclage	90

B1010.10.1d - ACV

	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	4,65E-05	1,56E-09	1,37E-09	4,48E-08	-1,96E-04
ADP fossile [MJ]	6,19E+02	5,78E-01	5,07E-01	1,76E+00	-3,57E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,37E-01	1,87E-04	1,62E-04	1,43E-03	-5,26E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,09E-02	4,30E-05	3,73E-05	3,06E-04	-1,48E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	5,18E+01	4,16E-02	3,65E-02	2,59E+00	-1,63E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	7,65E-07	7,29E-13	6,40E-13	8,46E-11	1,76E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,37E-02	-6,09E-05	-5,28E-05	1,90E-04	-1,12E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurale d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
OSB	PE International	Allemagne	2008
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
Acier léger	Worldsteel	Monde	2007
PUR	PE International	Allemagne	2011

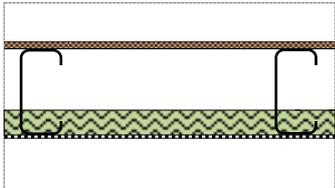
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération OSB	PE International	Allemagne	2008
Incinération PUR	PE International	Europe	2011
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B1010.10 Ossature de plancher

B1010.10.1e	Matériaux	Épaisseur/ densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	OSB (mm)	18	Incinération	80
	Cavité d'air (mm)	160		
	Liège (mm)	40	Recyclage	80
	Panneau de gypse (mm)	15	Recyclage	80
	Acier léger (kg/m ²)	14	Recyclage	90

B1010.10.1e - ACV

	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,72E-05	1,64E-09	1,43E-09	3,09E-08	-1,96E-04
ADP fossile [MJ]	5,04E+02	6,09E-01	5,32E-01	1,21E+00	-3,35E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,35E-01	1,97E-04	1,70E-04	5,26E-04	-4,45E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,13E-02	4,53E-05	3,91E-05	8,06E-05	-1,01E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	4,75E+01	4,38E-02	3,83E-02	3,54E-01	-1,46E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	7,64E-07	7,68E-13	6,71E-13	6,61E-11	1,76E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,27E-02	-6,42E-05	-5,54E-05	1,37E-04	-1,07E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurale d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
OSB	PE International	Allemagne	2008
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
Acier léger	Worldsteel	Monde	2007
Liège	PE International	Allemagne	2011

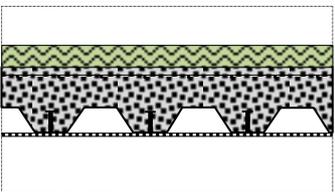
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération OSB	PE International	Allemagne	2008
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B1010.10 Ossature de plancher

B1010.10.2a	Matériaux	Épaisseur/ densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	PE (mm)	20	Incinération	80
	Béton (kg/m ²)	410	Recyclage	70
	Barres d'armature (kg/m ²)	8,24	Recyclage	70
	Tôle d'acier (kg/m ²)	11,10	Recyclage	70
	Panneau de gypse (mm)	15	Recyclage	80
	Structure d'acier (kg/m ²)	40	Recyclage	90

B1010.10.2a - ACV

	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-4,61E-04	2,08E-08	1,81E-08	1,26E-06	-3,32E-04
ADP fossile [MJ]	1,56E+03	7,71E+00	6,74E+00	4,90E+01	-3,44E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	3,93E-01	2,49E-03	2,16E-03	2,14E-02	-9,22E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,65E-02	5,73E-04	4,96E-04	3,28E-03	-2,77E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	1,51E+02	5,56E-01	4,86E-01	1,58E+01	-3,67E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	1,88E-06	9,73E-12	8,51E-12	2,68E-09	1,04E-06
POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,27E-02	-8,13E-04	-7,01E-04	5,54E-03	-1,90E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurelle d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

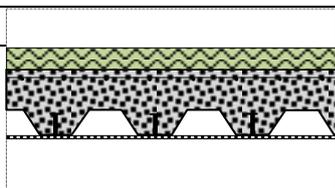
Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Béton	PE International	Allemagne	2011
Barres d'armature de renforcement	Worldsteel	Monde	2007
Tôle d'acier	Worldsteel	Monde	2007
Acier de construction	Worldsteel	Monde	2007
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
PE	PE International	Allemagne	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération PE	PE International	Europe	2011
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007
B1010.10 Ossature de plancher			
B1010.10.2b	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie
	EPS (mm)	20	Incinération
			RR (%)
			80



	Béton (kg/m ²)	410	Recyclage	70		
	Barres d'armature (kg/m ²)	8,24	Recyclage	70		
	Tôle d'acier (kg/m ²)	11,10	Recyclage	70		
	Panneau de gypse (mm)	15	Recyclage	80		
	Structure d'acier (kg/m ²)	40	Recyclage	90		
B1010.10.2b - ACV						
		A1-A3	A4	C2	C4	D
	ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-4,62E-04	2,08E-08	1,81E-08	1,26E-06	-3,32E-04
	ADP fossile [MJ]	1,54E+03	7,71E+00	6,74E+00	4,89E+01	-3,37E+02
	AP [kg SO ₂ -Equiv.]	3,92E-01	2,49E-03	2,16E-03	2,13E-02	-8,94E-02
	EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,64E-02	5,73E-04	4,96E-04	3,27E-03	-2,61E-03
	GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	1,50E+02	5,55E-01	4,86E-01	1,54E+01	-3,62E+01
	ODP [kg R11-Equiv.]	1,91E-06	9,73E-12	8,50E-12	2,68E-09	1,04E-06
	POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,92E-02	-8,13E-04	-7,01E-04	5,53E-03	-1,88E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurelle d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :**Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3**

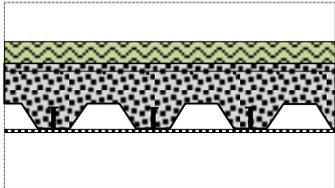
Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Béton	PE International	Allemagne	2011
Barres d'armature de renforcement	Worldsteel	Monde	2007
Tôle d'acier	Worldsteel	Monde	2007
Acier de construction	Worldsteel	Monde	2007
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
PSE	PE International	Europe	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture	Date
---------	-------------------	------------	------

		géographique			
Incinération EPS	PE International	Europe	2011		
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011		
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007		
B1010.10 Ossature de plancher					
B1010.10.2c	Matériaux	Épaisseur/ densité	Scénario de fin de vie	RR (%)	
	XPS (mm)	20	Incinération	80	
	Béton (kg/m ²)	410	Recyclage	70	
	Barres d'armature (kg/m ²)	8,24	Recyclage	70	
	Tôle d'acier (kg/m ²)	11,10	Recyclage	70	
	Panneau de gypse (mm)	15	Recyclage	80	
	Structure d'acier (kg/m ²)	40	Recyclage	90	
B1010.10.2c - ACV					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-4,62E-04	2,08E-08	1,82E-08	1,26E-06	-3,32E-04
ADP fossile [MJ]	1,56E+03	7,71E+00	6,74E+00	4,90E+01	-3,43E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	3,94E-01	2,49E-03	2,16E-03	2,14E-02	-9,19E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,65E-02	5,74E-04	4,96E-04	3,28E-03	-2,75E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	1,51E+02	5,56E-01	4,86E-01	1,60E+01	-3,66E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	1,88E-06	9,73E-12	8,51E-12	2,68E-09	1,04E-06
POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,39E-02	-8,13E-04	-7,01E-04	5,54E-03	-1,89E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurelle d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :**Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3**

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Béton	PE International	Allemagne	2011
Barres d'armature de renforcement	Worldsteel	Monde	2007
Tôle d'acier	Worldsteel	Monde	2007
Acier de construction	Worldsteel	Monde	2007
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
XPS	PE International	Allemagne	2011

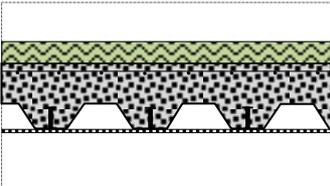
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération XPS	PE International	Europe	2011
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B1010.10 Ossature de plancher

B1010.10.2d	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	Liège (mm)	20	Recyclage	80
	Béton (kg/m ²)	410	Recyclage	70
	Barres d'armature (kg/m ²)	8,24	Recyclage	70
	Tôle d'acier (kg/m ²)	11,10	Recyclage	70
	Panneau de gypse (mm)	15	Recyclage	80
	Structure d'acier (kg/m ²)	40	Recyclage	90

B1010.10.2d - ACV

	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-4,62E-04	2,08E-08	1,82E-08	1,25E-06	-3,32E-04
ADP fossile [MJ]	1,52E+03	7,73E+00	6,76E+00	4,88E+01	-3,26E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	3,95E-01	2,50E-03	2,16E-03	2,13E-02	-8,54E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	3,73E-02	5,75E-04	4,97E-04	3,26E-03	-2,37E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	1,51E+02	5,57E-01	4,87E-01	1,43E+01	-3,53E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	1,88E-06	9,75E-12	8,53E-12	2,68E-09	1,04E-06
POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,28E-02	-8,15E-04	-7,03E-04	5,53E-03	-1,86E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurale d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture	Date
---------	-------------------	------------	------

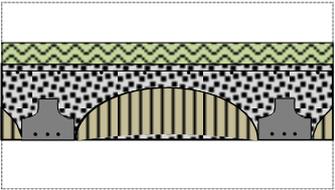
		géographique	
Béton	PE International	Allemagne	2011
Barres d'armature de renforcement	Worldsteel	Monde	2007
Tôle d'acier	Worldsteel	Monde	2007
Acier de construction	Worldsteel	Monde	2007
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
Liège	PE International	Allemagne	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B1010.10 Ossature de plancher					
B1010.10.3a	Matériaux	Épaisseur/ densité	Scénario de fin de vie	RR (%)	
	PE (mm)	20	Incinération	80	
	Béton (kg/m ²)	455,4	Recyclage	70	
	Barres d'armature (kg/m ²)	21,17	Recyclage	70	
B1010.10.3a					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-5,27E-05	2,07E-08	1,81E-08	1,36E-06	-1,09E-05
ADP fossile [MJ]	6,37E+02	7,68E+00	6,71E+00	5,31E+01	-4,99E+01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,62E-01	2,48E-03	2,15E-03	2,32E-02	-1,80E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	2,12E-02	5,71E-04	4,94E-04	3,55E-03	-7,25E-04
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	7,42E+01	5,53E-01	4,84E-01	1,70E+01	-5,44E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	2,64E-07	9,69E-12	8,47E-12	2,91E-09	3,61E-08
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,23E-02	-8,09E-04	-6,98E-04	6,00E-03	-2,31E-03

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurale d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :**Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3**

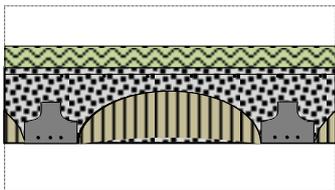
Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Béton	PE International	Allemagne	2011
Barres d'armature de renforcement	Worldsteel	Monde	2007
PE	PE International	Allemagne	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007
Incinération PE	PE International	Europe	2011

B1010.10 Ossature de plancher						
B1010.10.3b	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)		
	EPS (mm)	20	Incinération	80		
	Béton (kg/m ²)	455,4	Recyclage	70		
	Barres d'armature (kg/m ²)	21,17	Recyclage	70		
B1010.10.3b						
		A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]		-5,38E-05	2,07E-08	1,81E-08	1,36E-06	-1,09E-05
ADP fossile [MJ]		6,18E+02	7,68E+00	6,71E+00	5,30E+01	-4,24E+01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]		1,61E-01	2,48E-03	2,15E-03	2,31E-02	-1,52E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]		2,11E-02	5,71E-04	4,93E-04	3,55E-03	-5,61E-04
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]		7,36E+01	5,53E-01	4,83E-01	1,66E+01	-4,87E+00
ODP [kg R11-Equiv.]		2,93E-07	9,68E-12	8,46E-12	2,90E-09	3,61E-08
POCP [kg Ethene-Equiv.]		2,87E-02	-8,09E-04	-6,98E-04	6,00E-03	-2,14E-03

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurelle d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Béton	PE International	Allemagne	2011
Barres d'armature de renforcement	Worldsteel	Monde	2007
PSE	PE International	Europe	2011

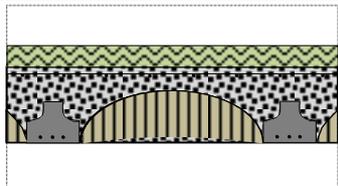
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007
Incinération EPS	PE International	Europe	2011

B1010.10 Ossature de plancher

B1010.10.3c	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	XPS (mm)	20	Incinération	80
	Béton (kg/m ²)	455,4	Recyclage	70
	Barres d'armature (kg/m ²)	21,17	Recyclage	70

B1010.10.3c

	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-5,35E-05	2,07E-08	1,81E-08	1,36E-06	-1,09E-05
ADP fossile [MJ]	6,37E+02	7,68E+00	6,71E+00	5,31E+01	-4,89E+01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,63E-01	2,48E-03	2,15E-03	2,32E-02	-1,77E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	2,12E-02	5,71E-04	4,94E-04	3,56E-03	-7,04E-04
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	7,42E+01	5,53E-01	4,84E-01	1,72E+01	-5,37E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	2,64E-07	9,69E-12	8,47E-12	2,91E-09	3,61E-08
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,35E-02	-8,09E-04	-6,98E-04	6,01E-03	-2,28E-03

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurale d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Béton	PE International	Allemagne	2011
Barres d'armature de	Worldsteel	Monde	2007

renforcement			
XPS	PE International	Europe	2011

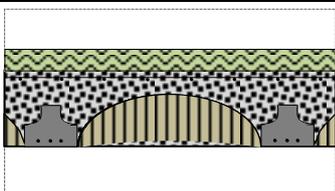
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007
Incinération XPS	PE International	Europe	2011

B1010.10 Ossature de plancher

B1010.10.3d	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	Liège (mm)	20	Recyclage	80
	Béton (kg/m ²)	455,4	Recyclage	70
	Barres d'armature (kg/m ²)	21,17	Recyclage	70

B1010.10.3d

	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	-5,40E-05	2,07E-08	1,83E-08	1,36E-06	-1,09E-05
ADP fossil [MJ]	6,02E+02	7,69E+00	6,80E+00	5,29E+01	-3,17E+01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,64E-01	2,49E-03	2,18E-03	2,31E-02	-1,12E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	2,19E-02	5,72E-04	5,00E-04	3,54E-03	-3,22E-04
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	7,40E+01	5,54E-01	4,90E-01	1,55E+01	-4,05E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	2,64E-07	9,71E-12	8,58E-12	2,90E-09	3,62E-08
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,24E-02	-8,11E-04	-7,07E-04	6,00E-03	-1,91E-03

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'une dalle structurale d'un bâtiment, conçue pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Béton	PE International	Allemagne	2011
Barres d'armature de renforcement	Worldsteel	Monde	2007
Liège	PE International	Allemagne	2011

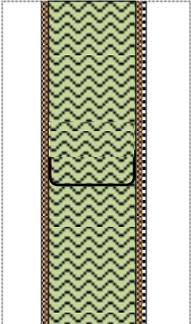
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B2010.20 Construction du mur extérieur

B2010.20.1a	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	OSB (mm)	13	Incinération	80
	Laine de roche (mm)	120	Recyclage	80
	Panneau de gypse (mm)	15	Décharge	
	Acier léger (kg/m ²)	15	Recyclage	90

B1010.20.1a

	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	3,06E-05	2,19E-09	1,92E-09	4,32E-08	-2,10E-04
ADP fossile [MJ]	7,09E+02	8,14E-01	7,12E-01	1,68E+00	-3,05E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	2,65E-01	2,63E-04	2,28E-04	7,35E-04	-4,81E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	2,41E-02	6,05E-05	5,23E-05	1,13E-04	-1,17E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	6,50E+01	5,86E-02	5,13E-02	4,94E-01	-1,73E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	6,43E-07	1,03E-12	8,98E-13	9,24E-11	3,41E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	3,27E-02	-8,58E-05	-7,40E-05	1,91E-04	-1,13E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :**Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3**

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
OSB	PE International	Allemagne	2008
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
Acier léger	Worldsteel	Monde	2007
Laine de roche	PE International	Europe	2011

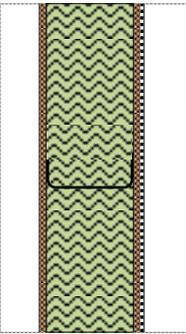
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération OSB	PE International	Allemagne	2008
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B2010.20 Construction du mur extérieur

B2010.20.1b	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	OSB (mm)	13	Incinération	80
	EPS (mm)	120	Incinération	80
	Panneau de gypse (mm)	15	Décharge	
	Acier léger (kg/m ²)	15	Recyclage	90

B1010.20.1b

	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,82E-05	1,93E-09	1,62E-09	5,61E-08	-2,10E-04
ADP fossile [MJ]	6,75E+02	7,18E-01	6,00E-01	1,84E+00	-3,70E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,44E-01	2,32E-04	1,92E-04	8,87E-04	-7,24E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,03E-02	5,34E-05	4,41E-05	1,50E-04	-2,60E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	5,18E+01	5,17E-02	4,33E-02	6,79E+00	-2,22E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	8,13E-07	9,05E-13	7,57E-13	8,54E-11	3,41E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	6,33E-02	-7,57E-05	-6,24E-05	1,70E-04	-1,27E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
OSB	PE International	Allemagne	2008
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
Acier léger	Worldsteel	Monde	2007
PSE	PE International	Europe	2011

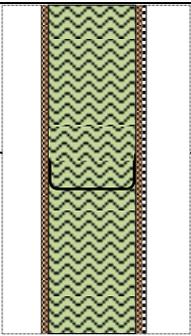
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération OSB	PE International	Allemagne	2008
Incinération EPS	PE International	Europe	2011
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B2010.20 Construction du mur extérieur

B2010.20.1c	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	OSB (mm)	13	Incinération	80
	XPS (mm)	120	Incinération	80
	Panneau de gypse (mm)	15	Décharge	

	Acier léger (kg/m ²)	15	Recyclage	90	
B1010.20.1c					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,99E-05	2,24E-09	1,84E-09	7,46E-08	-2,10E-04
ADP fossile [MJ]	7,89E+02	8,33E-01	6,85E-01	2,36E+00	-4,08E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,53E-01	2,69E-04	2,19E-04	1,16E-03	-8,70E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,09E-02	6,20E-05	5,04E-05	2,01E-04	-3,46E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	5,52E+01	6,00E-02	4,94E-02	1,07E+01	-2,52E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	6,41E-07	1,05E-12	8,65E-13	1,04E-10	3,41E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	3,16E-02	-8,79E-05	-7,13E-05	2,06E-04	-1,36E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :**Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3**

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
OSB	PE International	Allemagne	2008
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
Acier léger	Worldsteel	Monde	2007
XPS	PE International	Allemagne	2011

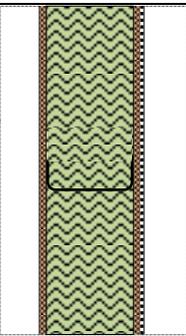
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération OSB	PE International	Allemagne	2008
Incinération XPS	PE International	Europe	2011
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B2010.20 Construction du mur extérieur

B2010.20.1d	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	OSB (mm)	13	Incinération	80
	PUR (mm)	120	Incinération	80
	Panneau de gypse	15	Décharge	

	(mm)				
	Acier léger (kg/m ²)	15	Recyclage		90
B1010.20.1d					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	8,52E-05	2,24E-09	1,84E-09	7,64E-08	-2,10E-04
ADP fossile [MJ]	9,22E+02	8,33E-01	6,85E-01	3,02E+00	-3,70E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,66E-01	2,69E-04	2,19E-04	3,30E-03	-7,23E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,43E-02	6,20E-05	5,04E-05	7,68E-04	-2,60E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	6,70E+01	6,00E-02	4,94E-02	7,11E+00	-2,22E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	6,44E-07	1,05E-12	8,65E-13	1,30E-10	3,41E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,81E-02	-8,79E-05	-7,13E-05	3,15E-04	-1,27E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :**Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3**

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
OSB	PE International	Allemagne	2008
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
Acier léger	Worldsteel	Monde	2007
PUR	PE International	Allemagne	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération OSB	PE International	Allemagne	2008
Incinération PUR	PE International	Europe	2011
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B2010.20 Construction du mur extérieur

B2010.20.1e	Matériaux	Épaisseur/ densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	OSB (mm)	13	Incinération	80
	Liège (mm)	120	Recyclage	80



	Panneau de gypse (mm)	15	Décharge		
	Acier léger (kg/m ²)	15	Recyclage	90	
B1010.20.1e					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,72E-05	3,49E-09	1,60E-09	3,48E-08	-2,10E-04
ADP fossile [MJ]	5,78E+02	1,30E+00	5,94E-01	1,36E+00	-3,05E+02
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,60E-01	4,19E-04	1,90E-04	5,92E-04	-4,81E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,55E-02	9,64E-05	4,37E-05	9,07E-05	-1,17E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	5,39E+01	9,34E-02	4,28E-02	3,98E-01	-1,73E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	6,40E-07	1,64E-12	7,49E-13	7,44E-11	3,41E-07
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,50E-02	-1,37E-04	-6,17E-05	1,54E-04	-1,13E-02

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :**Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3**

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
OSB	PE International	Allemagne	2008
Panneau de gypse	PE International	Europe	2008
Acier léger	Worldsteel	Monde	2007
Liège	PE International	Allemagne	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

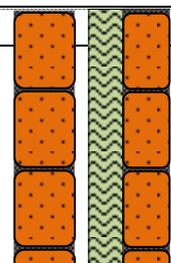
Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération OSB	PE International	Allemagne	2008
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Recyclage de l'acier	Worldsteel	Monde	2007

B2010.20 Construction du mur extérieur

B2010.20.2a	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	Mur en brique (mm)	11	Décharge	



	Cavité d'air (mm)	0			
	Laine de roche (mm)	60	Recyclage	80	
	Mur en brique (mm)	11	Décharge		
B1010.20.2a					
		A1-A3	A4	C2	C4
	ADP elements [kg Sb-Equiv.]	4,00E-06	1,37E-08	1,20E-08	1,55E-06
	ADP fossile [MJ]	6,11E+02	5,10E+00	4,46E+00	6,05E+01
	AP [kg SO ₂ -Equiv.]	1,33E-01	1,65E-03	1,43E-03	2,64E-02
	EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,58E-02	3,79E-04	3,28E-04	4,04E-03
	GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	8,12E+01	3,67E-01	3,21E-01	1,78E+01
	ODP [kg R11-Equiv.]	3,62E-09	6,43E-12	5,62E-12	3,32E-09
	POCP [kg Ethene-Equiv.]	1,21E-02	-5,37E-04	-4,64E-04	6,86E-03

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :**Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3**

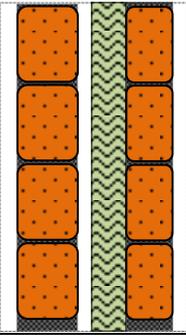
Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Brique	PE International	Allemagne	2011
Laine de roche	PE International	Europe	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011

B2010.20 Construction du mur extérieur						
	B2010.20.2b	Matériaux	Épaisseur/ densité	Scénario de fin de vie	RR (%)	
	Mur en brique (mm)	11	Décharge			
	Cavité d'air (mm)	0				
	EPS (mm)	60	Incinération	80		
Mur en brique (mm)	11	Décharge				
B1010.20.2b						
		A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,81E-06	1,34E-08	1,17E-08	1,56E-06	-4,49E-08	
ADP fossile [MJ]	5,94E+02	4,97E+00	4,35E+00	6,06E+01	-3,21E+01	
AP [kg SO2-Equiv.]	7,23E-02	1,61E-03	1,39E-03	2,65E-02	-1,22E-02	
EP [kg Phosphate-Equiv.]	8,96E-03	3,70E-04	3,20E-04	4,06E-03	-7,17E-04	
GWP [kg CO2-Equiv.]	7,46E+01	3,58E-01	3,13E-01	2,09E+01	-2,46E+00	
ODP [kg R11-Equiv.]	8,86E-08	6,27E-12	5,48E-12	3,31E-09	-4,97E-11	
POCP [kg Ethene-Equiv.]	2,74E-02	-5,24E-04	-4,52E-04	6,85E-03	-7,02E-04	

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

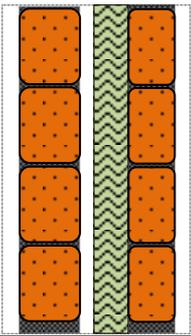
Complément d'information :**Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3**

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Brique	PE International	Allemagne	2011
PSE	PE International	Europe	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date		
Incinération EPS	PE International	Europe	2011		
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011		
B2010.20 Construction du mur extérieur					
B2010.20.2c	Matériaux	Épaisseur/ densité	Scénario de fin de vie		
	Mur en brique (mm)	11	Décharge		
	Cavité d'air (mm)	0			
	XPS (mm)	60	Incinération		
	Mur en brique (mm)	11	Décharge		
B1010.20.2c					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	3,64E-06	1,34E-08	1,17E-08	1,57E-06	-7,18E-08
ADP fossile [MJ]	6,51E+02	4,98E+00	4,36E+00	6,08E+01	-5,14E+01
AP [kg SO2-Equiv.]	7,67E-02	1,61E-03	1,39E-03	2,66E-02	-1,95E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	9,23E-03	3,71E-04	3,20E-04	4,09E-03	-1,15E-03
GWP [kg CO2-Equiv.]	7,63E+01	3,59E-01	3,14E-01	2,29E+01	-3,94E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	3,00E-09	6,29E-12	5,50E-12	3,32E-09	-7,96E-11
POCP [kg Ethene-Equiv.]	1,15E-02	-5,25E-04	-4,53E-04	6,87E-03	-1,12E-03

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

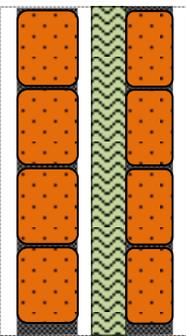
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Brique	PE International	Allemagne	2011
XPS	PE International	Allemagne	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date		
Incinération XPS	PE International	Europe	2011		
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011		
B2010.20 Construction du mur extérieur					
B2010.20.2d	Matériaux	Épaisseur/densité	Scénario de fin de vie	RR (%)	
	Mur en brique (mm)	11	Décharge		
	Cavité d'air (mm)	0			
	PUR (mm)	60	Incinération	80	
	Mur en brique (mm)	11	Décharge		
B1010.20.2d					
	A1-A3	A4	C2	C4	D
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	3,13E-05	1,34E-08	1,17E-08	1,57E-06	-4,52E-08
ADP fossile [MJ]	7,17E+02	4,98E+00	4,36E+00	6,12E+01	-3,22E+01
AP [kg SO2-Equiv.]	8,33E-02	1,61E-03	1,39E-03	2,77E-02	-1,21E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,09E-02	3,71E-04	3,20E-04	4,37E-03	-7,15E-04
GWP [kg CO2-Equiv.]	8,22E+01	3,59E-01	3,14E-01	2,11E+01	-2,46E+00
ODP [kg R11-Equiv.]	4,11E-09	6,29E-12	5,50E-12	3,34E-09	-4,99E-11
POCP [kg Ethene-Equiv.]	9,80E-03	-5,25E-04	-4,53E-04	6,92E-03	-7,02E-04

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Brique	PE International	Allemagne	2011
PUR	PE International	Allemagne	2011

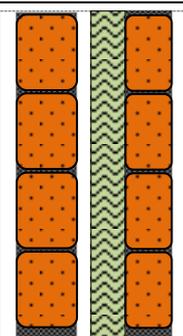
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Incinération PUR	PE International	Europe	2011
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011

B21010.20 Construction du mur extérieur

B21010.20.2e	Matériaux	Épaisseur/ densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	Mur en brique (mm)	11	Décharge	
	Cavité d'air (mm)	0		
	Liège (mm)	60	Recyclage	80
	Mur en brique (mm)	11	Décharge	

B1010.20.2e

	A1-A3	A4	C2	C4
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,27E-06	1,35E-08	1,18E-08	1,55E-06
ADP fossile [MJ]	5,46E+02	5,03E+00	4,40E+00	6,03E+01
AP [kg SO ₂ -Equiv.]	8,06E-02	1,63E-03	1,41E-03	2,63E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,16E-02	3,74E-04	3,23E-04	4,03E-03
GWP [kg CO ₂ -Equiv.]	7,57E+01	3,62E-01	3,17E-01	1,77E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	2,30E-09	6,35E-12	5,55E-12	3,31E-09
POCP [kg Ethene-Equiv.]	8,25E-03	-5,30E-04	-4,57E-04	6,84E-03

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Brique	PE International	Allemagne	2011
Liège	PE International	Allemagne	2011

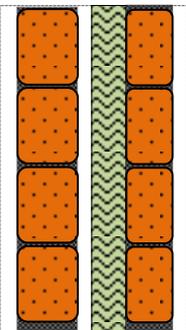
Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011

B2010.20 Construction du mur extérieur

B2010.20.2f	Matériaux	Épaisseur/ densité	Scénario de fin de vie	RR (%)
	Mur en brique (mm)	11	Décharge	
	Cavité d'air (mm)	0		
	Laine de verre (mm)	60	Décharge	
	Mur en brique (mm)	11	Décharge	

B1010.20.2f

	A1-A3	A4	C2	C4
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	6,07E-04	1,35E-08	1,18E-08	1,55E-06
ADP fossil [MJ]	6,13E+02	5,01E+00	4,38E+00	6,05E+01
AP [kg SO2-Equiv.]	9,80E-02	1,62E-03	1,40E-03	2,67E-02
EP [kg Phosphate-Equiv.]	1,33E-02	3,73E-04	3,22E-04	5,07E-03
GWP [kg CO2-Equiv.]	7,81E+01	3,61E-01	3,16E-01	1,83E+01
ODP [kg R11-Equiv.]	3,81E-09	6,32E-12	5,53E-12	-3,92E-09
POCP [kg Ethene-Equiv.]	8,60E-03	-5,28E-04	-4,56E-04	7,01E-03

Équivalent fonctionnel :

1 m² d'un mur extérieur d'un bâtiment, conçu pour une durée de vie de 50 ans, avec une transmission thermique (U) de 0,92 W/m².K et une inertie thermique (κ_m) de 61060 J/m².K.

Complément d'information :

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A1-A3

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Brique	PE International	Allemagne	2011
Laine de verre	PE International	Europe	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans les Modules A4 et C2 (en supposant des distances de 20 km)

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Transport par camion	PE International	Monde	2011

Liste des ensembles de données utilisés dans le Module C4-D

Procédé	Source de données	Couverture géographique	Date
Décharge de matières inertes	PE International	Allemagne	2011
Décharge de matériaux inertes	PE International	Allemagne	2010