

Rapport de Stage  
Hélène Leh

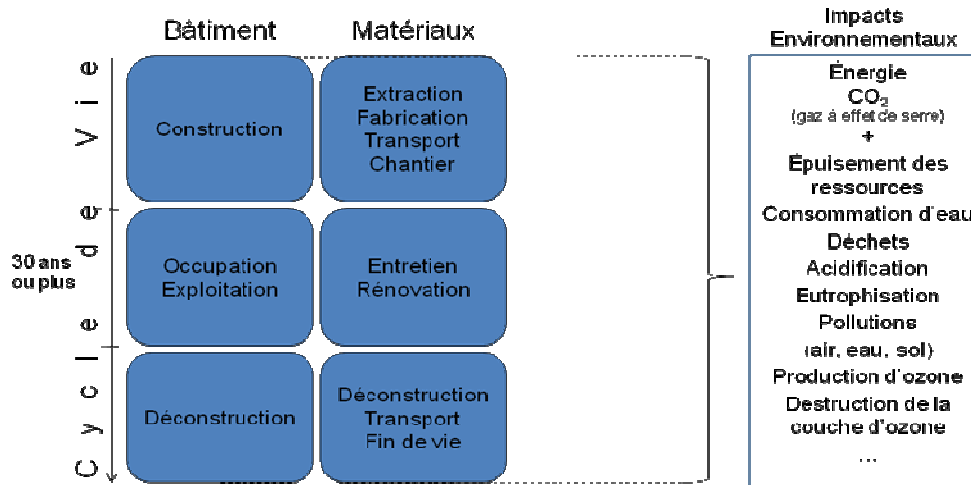
# Evaluation des Impacts Environnementaux des Bâtiments Au niveau Structure et Matériaux

Mai – Septembre 2010

# SYNTHESE

## Sous forme de Questions/Réponses

### 1. Qu'est ce que l'impact environnemental d'un bâtiment ?



Jusqu'à présent, on s'intéressait principalement à l'énergie nécessaire lors de la phase d'occupation et d'exploitation du bâtiment. Comme on tend de plus en plus à réduire, voire à faire disparaître, cette énergie, on se préoccupe dorénavant **de tout le cycle de vie du bâtiment**, afin d'évaluer l'énergie nécessaire également à la construction et la déconstruction du bâtiment.

L'évaluation des impacts environnementaux correspond alors à une Analyse de Cycle de Vie (ACV). Afin de pouvoir réaliser une étude précise, on s'intéresse directement aux matériaux utilisés, **depuis l'extraction de la matière première, jusqu'à la fin de vie** (valorisation, mise en décharge,...). Ainsi on prend en compte non seulement l'énergie, mais également les autres flux entrant (matières premières, eau) et sortant (déchets, émissions, pollutions,...). On appelle alors « impacts environnementaux » les indicateurs qui en découlent, qui sont soit directement **des quantités de flux** (m<sup>3</sup> d'eau, kg de déchets,...) ou **des indicateurs de potentiel** (changement climatique en kg équivalent CO<sub>2</sub>, acidification en kg équivalent SO<sub>2</sub>,...).

### 2. Pourquoi est-il intéressant de les identifier ?

Le but de l'évaluation des impacts environnementaux n'est pas de donner les résultats d'un ouvrage en valeur absolue, mais de faire des études relatives **pour comparer différentes solutions constructives** ; ce type d'étude doit être une **aide à la décision**, en plus des autres critères à prendre en compte lors de la réalisation d'un projet (thermique, éclairage, confort, qualité de l'air,...).

### 3. Quelles sont les bases de données existantes ?

En France, il existe les **FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire)**(Norme NF P01-010) qui concernent exclusivement les matériaux utilisés dans la construction. Ses caractéristiques principales sont :

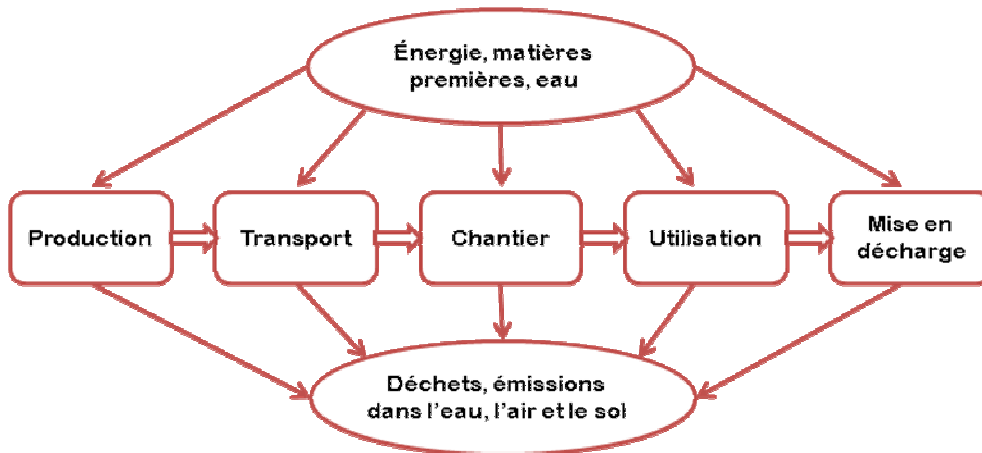
- une FDES peut traiter d'**un produit en particulier** (tel produit de tel fabricant), de plusieurs produits d'une même gamme en prenant le plus impactant en référence, d'un même type de produit provenant de différents industriels mais dont la fonction et les procédés de fabrication sont proches ;
- elle se rapporte à **une unité fonctionnelle (UF)**, par exemple isoler de tant pour 1m<sup>2</sup> de paroi.
- elles ne servent pas à comparer les produits entre eux, mais à **évaluer l'ensemble d'un ouvrage**.
- Les FDES sont produites sous la décision du fabricant, et sont regroupées dans la **base de données INIES (www.inies.fr)**.

En Europe il existe les **EPD (Environmental Product Declaration)**, qui se rapprochent des FDES mais concernent tout type de produit, et dont l'utilisation est plutôt vouée à des fins interentreprises, pour comparer des produits remplissant la même fonction et satisfaire la demande pour les produits qui génèrent moins d'impacts.

En Suisse il existe la base de données Ecoinvent dont le contenu est plus vaste puisqu'il comprend les inventaires de cycle de vie pour les énergies, les matériaux, le traitement des déchets, les trafics, et différents procédés, qui permettront alors de réaliser des ACV. Il s'agit donc de données à traiter, qu'il serait trop laborieux d'utiliser directement pour un ouvrage.

#### 4. FDES : Quelles sont les frontières de l'étude ? Quels sont les indicateurs d'impact ?

Les flux entrants, les étapes, et les flux sortants sont les suivants :



Les transports propres aux étapes de Production et de Mise en décharge sont également pris en compte. L'Utilisation correspond à l'entretien et la rénovation éventuels des produits.

Afin de limiter l'étude, certains flux sont omis : les consommations dues à l'occupation des ateliers de production (chauffage, éclairage), le département administratif, le transport des employés (fabrication, chantier), la fabrication des outils de production et de transport.

Les indicateurs qui résultent de l'évaluation des différents flux sont les suivants :

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| - Énergie primaire Totale           | - Déchets radioactifs                              |
| - Énergie primaire Non renouvelable | - Changement climatique                            |
| - Énergie primaire Renouvelable     | - Acidification atmosphérique                      |
| - Épuisement des ressources         | - Pollution de l'air                               |
| - Consommation d'eau totale         | - Pollution de l'eau                               |
| - Déchets valorisés total           | - Destruction de la couche d'ozone stratosphérique |
| - Déchets dangereux                 | - Formation d'ozone photochimique                  |
| - Déchets non dangereux             |  |
| - Déchets inertes                   |  |

#### 5. FDES : Quels sont les points sensibles ? Pourquoi ?

**L'énergie matière :** Il s'agit de l'énergie "contenue" dans les matériaux, qui pourraient être utilisés comme combustible ; elle s'oppose à l'« énergie procédé », qui est l'énergie nécessaire à la transformation du matériau en produit. La somme des deux donne l'Énergie Primaire Totale. Or cette énergie matière défavorise par exemple les produits à base de bois, puisque leur énergie totale sera plus élevée, alors que l'énergie matière devrait plutôt être un point positif, puisque pouvant être récupérée en fin de vie.

**Le stockage du CO<sub>2</sub> :** Les produits issus de matériaux capables de stocker du CO<sub>2</sub> sont considérés comme stockant ce CO<sub>2</sub> tout au long de leur cycle de vie. Ce CO<sub>2</sub> est alors compté négativement dans la phase de production du matériau. Ce choix n'est pas un problème si l'on considère qu'il s'agit de matériaux renouvelables et que d'autres arbres seront plantés, stockant ainsi le CO<sub>2</sub> que les produits en fin de vie pourraient à nouveau libérer en brûlant ou en se décomposant.

**Déchets :** Le scénario de fin de vie est commun à tous les produits et correspond à une mise en décharge ; ce choix semble délicat au vu des différentes possibilités qui existent en fin de vie.

**Transport :** Les impacts dus à la phase de transport sont calculés précisément à partir de la quantité de gasoil consommé et donc du nombre de kilomètres parcourus. Cependant une valeur indicative de 30km est spécifiée dans les FDES, qui peut être modifiée ou non par l'industriel. Il y a donc un déséquilibre d'information entre ceux qui choisissent d'utiliser une valeur plus proche de la réalité et ceux qui ne le font pas.

Equipements : Les FDES ne concernant que les matériaux de construction, les produits relatifs aux équipements de chaud et de froid ne sont pas pris en compte. Cela inclut par exemple les tuyaux de plomberie, les gaines de ventilation, les câbles électriques. Bien qu'il soit évident que le matériau les constituant peut difficilement être modifié, on peut songer à optimiser les systèmes et leur disposition. Des fiches équivalentes aux FDES devraient se développer de plus en plus en ce qui concerne les équipements électriques (PEP).

**6. Est-ce que tous les impacts sont importants à identifier ? Si non, lesquels sont pris en compte ? Pourquoi ?**

Au vu de leur nombre, qui rend la comparaison de deux projets quasi impossible, et du fait qu'il n'est pas évident de se représenter ce qu'ils impliquent, seuls l'énergie primaire totale (que l'on appellera « **énergie grise** ») et le **changement climatique** (gaz à effet de serre) ont été retenus. En effet ces deux critères sont les plus connus et les plus parlants puisque également évalués pour les consommations d'occupation (chauffage, clim,...) et les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes, ce qui nous permet d'avoir des ordres de grandeur et de comparer le cycle de vie du bâtiment à cette phase d'occupation.

Il faut tout de même rester vigilant quant à certains matériaux qui pourraient avoir des impacts réducteurs, et privilégier les matériaux recyclés, recyclables, et d'origine renouvelable.

**7. Quels sont les logiciels disponibles et testés ? Quels sont les avantages et les inconvénients de chacun ?**

Les logiciels retenus pour être testés sont Elodie, Equer et Cocon.

	<b>Elodie</b>	<b>Equer</b>	<b>Cocon</b>
<b>Développeur</b>	CSTB	Izuba B.Peuportier	L. Floissac
<b>Format</b>	Interface en ligne	Module de Comfie	Fichier Excel
<b>Données</b>	FDES	Ecoinvent	FDES et autres
<b>Indicateurs</b>	17 (FDES)	12	17 (FDES)
<b>Avantages</b>	Accès direct aux FDES	Comparaison directe de l'énergie grise et des consommations d'occupation	Nombreuses fonctionnalités de calcul, base de données importante
<b>Inconvénients</b>	Base de données limitée modes de présentation des résultats limités, interface non pratique	Base de données limitée, modes de présentation des résultats limités, dépendance avec Comfie	

**8. Lequel est le plus adapté pour INA et pourquoi ? Que peut-on exactement faire avec ?**

Elodie et Equer ont été rapidement éliminés pour les raisons citées dans le tableau. Il est tout de même à noter que les résultats obtenus sur les projets avec Equer et Cocon sont quasiment identiques. Les calculs de consommation obtenus avec Equer n'ont pas été retenus du fait du manque de transparence par rapport aux paramètres d'entrée et aux calculs.

La base de données de Cocon est la plus développée, puisqu'elle récupère les FDES d'INIES, mais intègre également des FDES qui ne sont pas encore intégrées à INIES ; certaines valeur sont calculées par l'auteur lui-même, et pour finir quelques produits de bases de données Suisse sont utilisés (Ecoinvent, Oekobilanzdaten).

Cocon permet non seulement de comparer les impacts à différents niveaux (produit, paroi, bâtiment) mais également de différentes façons (1 critère, 2 critères, 6 notes). Les données sont facilement récupérables, par rapport aux impacts, mais également à la thermique. Cocon calcule aussi le déphasage, l'inertie et la résistance thermique.

Cocon peut être utilisé de différentes façons :

- en « calculatrice », pour des évaluations thermiques
- pour comparer différentes parois
- pour comparer différentes variantes d'un bâtiment
- pour évaluer le poids relatif des familles de paroi dans un bâtiment (murs, dalles...)

## 9. Quelles sont les fonctions utiles à venir ?

Cocon étant en constante évolution, il devrait intégrer dans des versions ultérieures les fonctions suivantes :

- déduction de l'énergie matière
- modification des distances de transport
- calcul du point de rosée dans une paroi
- prise en compte des équipements techniques

## 10. Quels sont les cas qui ont été étudiés ? Pourquoi ?

	Variantes	But
<b>Bâtiments existants</b>		
<b>CE de Roissy</b>	- base : structure en bois - autre : structure béton/acier (type 657-658)	- aborder le problème de l'énergie matière - comparer énergie grise et énergie d'occupation - poids relatif des parois, des lots, et des matériaux
<b>SSLIA de Roissy</b>	- base : RT 2005 - autres : BBC, BEPAS, BEPOS	- observer l'effet de l'augmentation de l'isolation - comparer énergie grise et énergie d'occupation - poids relatif des parois, des lots, et des matériaux
<b>Projets en cours</b>		
<b>Rénovation du 2B</b>	- parois vitrées/parois opaques - matériau en sous-face des coques - matériau des sheds - matériau en paroi de la zone PIF	- observer le changement d'impact en opacifiant une partie des vitrages - observer la part d'impact de certains matériaux

## 11. Quels enseignements en a-t-on tirés ?

<b>Concernant les impacts environnementaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- privilégier les analyses d'impact "énergie grise" et "CO<sub>2</sub>" parmi l'ensemble des critères environnementaux</li> <li>- déduire autant que possible l'"énergie matière" dans le cas des matériaux bois</li> <li>- le niveau d'isolation d'un bâtiment a un impact faible sur son énergie grise totale</li> <li>- pour des hautes performances énergétiques, l'énergie grise peut représenter 50% des consommations, voire plus</li> <li>- la proportion de surfaces opaques/vitrées n'a qu'une très faible influence sur l'énergie grise du bâtiment</li> </ul>									
<b>Concernant les matériaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- attention à l'emploi de matériaux peu courants qui peuvent avoir un impact important (vérifier les données auprès des fournisseurs et voir solution alternative)</li> <li>- attention au recours à des matériaux très impactants même en faible quantité (étanchéité toiture, polyuréthane...)</li> <li>- choix structurel :</li> </ul> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Béton/Acier</th> <th>Bois</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>Énergie grise</th> <td style="text-align: center;">=</td> <td style="text-align: center;">=</td> </tr> <tr> <th>CO<sub>2</sub></th> <td style="text-align: center;">--</td> <td style="text-align: center;">++</td> </tr> </tbody> </table> <p>=&gt; privilégier le bois au maximum dans la mesure où c'est compatible avec d'autres paramètres (usage du bâtiment, acoustique, confort,...)</p>		Béton/Acier	Bois	Énergie grise	=	=	CO <sub>2</sub>	--	++
	Béton/Acier	Bois								
Énergie grise	=	=								
CO <sub>2</sub>	--	++								




## 12. Quelles sont les recommandations pour les prochaines études ?

- Maîtriser l'inventaire des données d'entrées (composition des parois, épaisseur de chaque matériau, surface de chaque type de paroi) nécessaire à l'étude
- Ne pas oublier la prise en compte des autres impacts des matériaux (confort, qualité de l'air,...)
- En cas d'absence de données sur les matériaux utilisés dans un projet, cerner ses impacts par la saisie de matériaux équivalents, ou exiger des données directement du fournisseur

## 13. Quelles peuvent être les questions à se poser lors de futurs projets ?

- Est-il possible de substituer chaque fois que possible les matériaux réputés à fort impact par d'autres solutions ?
- Peut-on intégrer du bois au maximum chaque fois que possible ?
- Cas d'une démolition-reconstruction : vérifier la pertinence par rapport à une rénovation lourde

# Table des Matières

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
1.1. RAISON D'ETRE DU STAGE .....	3
1.2. OBJECTIFS .....	3
1.2.1. Identifier les problèmes et les enjeux.....	3
1.2.2. Choix d'un outil.....	4
<b>2. CONTEXTE DE L'ETUDE.....</b>	<b>5</b>
2.1. LES NORMES.....	5
2.1.1. L'ACV – ISO 14040 .....	5
2.1.2. Les FDES – NF P01-010.....	5
Règles et définitions.....	6
Données et indicateurs.....	6
Aspect « sanitaire » .....	7
Rédaction et distribution .....	7
2.2. AUTRES BASES DE DONNEES RELATIVES AUX ACV .....	8
2.2.1. Ecoinvent .....	8
2.2.2. EPD .....	8
2.3. DEBATS ET PROBLEMATIQUES .....	8
2.3.1. FDES : Energie matière .....	8
2.3.2. FDES : Stockage du CO <sub>2</sub> .....	10
2.3.3. FDES : Transport.....	10
2.3.4. FDES : Déchets.....	11
2.3.5. Produits étrangers.....	11
2.3.6. Equipements.....	11
<b>3. PRESENTATION ET COMPARATIF DES LOGICIELS.....</b>	<b>13</b>
3.1. ELODIE  .....	13
3.1.1. Entrées, utilisation - fonctionnement.....	13
3.1.2. Base de données.....	13
3.1.3. Sorties.....	13
3.2. COCON  .....	14
3.2.1. Entrées, utilisation – fonctionnement.....	14
3.2.2. Base de données.....	15
3.2.3. Sorties.....	15
3.3. EQUER  .....	17
3.3.1. Entrées, utilisation – fonctionnement.....	17
3.3.2. Base de données.....	17
3.3.3. Sorties.....	18
3.4. PREMIERES CONCLUSIONS.....	18
3.4.1. Concernant les logiciels.....	18
3.4.2. Concernant les indicateurs.....	18
<b>4. ETUDE DE PROJETS EXISTANTS : CE DE ROISSY ET SSLIA DE ROISSY .....</b>	<b>19</b>
4.1. CE DE ROISSY .....	19
4.1.1. Rôle du bâtiment.....	19
4.1.2. But de l'étude – Variantes.....	19
4.1.3. Composition et matériaux – Cocon.....	20
4.1.4. Simulation et scénarios – Comfie.....	21
4.2. SSLIA DE ROISSY .....	22
4.2.1. Rôle du bâtiment et stade du projet.....	22
4.2.2. But de l'étude – variantes.....	22
4.2.3. Composition et matériaux – Cocon.....	23
4.2.4. Simulation et scénarios – Comfie.....	23

4.3. RESULTATS .....	25
4.3.1. <i>Equer VS Cocon</i> .....	25
4.3.2. <i>Part de l'énergie matière et stockage du CO<sub>2</sub></i> .....	25
4.3.3. <i>Energie grise et Consommations d'occupation</i> .....	27
Bâtiment du CE.....	27
Bâtiment du SSLIA.....	29
4.3.4. <i>Notes Cocon</i> .....	29
4.3.5. <i>Poids relatif</i> .....	31
Différentes classifications.....	31
Vitrages.....	33
<b>5. ETUDE D'UN PROJET EN COURS : RENOVATION DE L'AEROGARE 2B .....</b>	<b>35</b>
5.1. PRESENTATION .....	35
5.2. BUT DE L'ETUDE.....	35
5.3. UTILISATION DE MATERIAUX SPECIFIQUES .....	35
5.3.1. <i>Inventaire des surfaces et des matériaux</i> .....	35
5.3.2. <i>Cas 1 : Danpalon</i> .....	37
5.3.3. <i>Cas 2 : Ductal</i> .....	37
5.3.4. <i>Cas 3 : Hi-MACS</i> .....	38
5.3.5. <i>Conclusion</i> .....	38
5.4. ETUDE SUR LE POURCENTAGE DE SURFACE VITREE .....	38
5.5. COMPARAISON AVEC LES CONSOMMATIONS.....	41
<b>6. CONCLUSIONS ET OBSERVATIONS .....</b>	<b>42</b>
6.1. CONCLUSION SUR LES DIFFERENTS LOGICIELS.....	42
6.1.1. <i>Utilisation – ergonomie, souplesse, résultats</i> .....	42
6.1.2. <i>Bases de données</i> .....	42
6.2. ENSEIGNEMENTS TIRES DES PROJETS CONCERNANT LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	43
6.2.1. <i>Impact de l'isolant et d'autres matériaux</i> .....	43
6.2.2. <i>Rapport entre les matériaux et les consommations</i> .....	44
6.2.3. <i>Vigilance par rapport aux résultats</i> .....	44
<b>7. ETUDES DIVERSES.....</b>	<b>45</b>
7.1. DEPHASAGE/INERTIE .....	45
7.2. OUTIL INAS.....	46
7.3. OUTIL DE CALCUL D'IMPACT DU TRANSPORT.....	46
<b>8. BILAN.....</b>	<b>48</b>
8.1. LOGICIELS ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX – RAPPELS .....	48
8.2. RECAPITULATIF DES RECOMMANDATIONS .....	48
8.3. USAGE DE COCON.....	49
8.3.1. <i>Précautions d'emploi</i> .....	49
8.3.2. <i>Fonctions à venir</i> .....	49
8.3.3. <i>Rappel des actions possibles et intéressantes pour INA</i> .....	49
8.4. ENSEIGNEMENTS ET SUITES A DONNER AU STAGE .....	49
<b>9. REFERENCES.....</b>	<b>51</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>52</b>
9.1. DEFINITION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX SELON NF P01-010.....	53
9.2. CALCUL DU TRANSPORT SELON FD P01-015 – FASCICULE DE DONNEES.....	54
9.3. CALCUL DES 6 NOTES DE COCON .....	55
9.4. SCENARIOS HORAIRE DU BATIMENT DU CE.....	56
9.5. CALCUL D'ENERGIE PRIMAIRE POUR LES CONSOMMATIONS.....	60

# 1. Introduction

---

## 1.1. Raison d'être du stage

Actuellement, la consommation d'énergie du secteur du bâtiment en France représente 43% de la consommation d'énergie totale, et 21% des émissions de CO<sub>2</sub>. C'est pourquoi le secteur n'est pas épargné par l'objectif de "facteur 4" pour les émissions de gaz à effet de serre (GES) (diviser par 4 les émissions de GES entre 1990 et 2050) et est le premier concerné lorsqu'il s'agit d'amélioration des performances énergétiques. En effet, diminuer les GES est réalisable non seulement en utilisant des énergies renouvelables mais également, et surtout, en prenant le problème par la racine, c'est-à-dire limiter les consommations énergétiques. La loi Grenelle II, dont l'objectif est de généraliser les bâtiments basse consommation (BBC), est secondée par la nouvelle réglementation thermique (RT 2012), qui limitera la consommation d'énergie primaire du bâtiment neuf à un seuil dépendant de la nature de l'ouvrage (objectif global moyen de 50 kilowattheures d'énergie primaire par mètre carré et par an (kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>/an)). Si ces indicateurs de consommation concernent la phase d'utilisation du bâtiment (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, et éclairage pour le tertiaire), il ne faut pas oublier pour autant que la construction mais également la démolition d'un bâtiment nécessitent de l'énergie (renouvelable ou non) et sont sources de pollutions (eau, air) et d'émissions (CO<sub>2</sub>, ozone,...) ; c'est ce qu'on appelle les impacts environnementaux. Si on considère le cycle de vie entier d'un bâtiment, on peut également se demander quels sont les impacts du transport des matériaux jusqu'au chantier, et encore plus haut, l'impact de la fabrication de ces matériaux.

Parce qu'Aéroports de Paris (ADP) n'échappe pas aux réglementations, mais aussi par volonté propre d'amélioration des performances et de limitation des consommations et des émissions, il m'a été demandé de m'intéresser à :

### **"L'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments neuf, ou en rénovation, au niveau structure et matériaux"**

Après avoir présenté mes différents objectifs, et développé le sujet des impacts environnementaux, ce rapport développera les études menées à ce sujet, qui auront permis de cibler les problèmes et les questions intéressantes pour ADP.

## 1.2. Objectifs

### 1.2.1. Identifier les problèmes et les enjeux

La problématique des impacts environnementaux étant en plein expansion et son application concrète à ses balbutiements, les références à ce sujet sont encore diverses et les avis partagés. Bien qu'il existe déjà des normes dans le domaine, les sujets de controverse ne manquent pas, et il n'est donc pas évident de se rendre compte des vrais problèmes et de la prudence avec laquelle il faut considérer un certain nombre de données "officielles". Un des principaux objectifs de cette étude est donc de **débroussailler le vaste sujet des impacts environnementaux pour ensuite pouvoir s'intéresser aux véritables enjeux**.

En effet, il est nécessaire de savoir **quels sont les problèmes propres à ADP**. S'il paraît évident que pour une maison individuelle il est possible de se poser la question d'une isolation à base de paille plutôt qu'un autre isolant plus industriel, la question ne se posera même pas pour une aérogare, par exemple. Il est donc préférable de savoir, dans un premier temps, si la problématique des impacts environnementaux est applicable aux bâtiments tertiaires, qui nécessitent des modes de construction et des contraintes spécifiques, et dans un deuxième temps à quel moment il faut se poser la question de ces impacts.



Afin d'évaluer les impacts environnementaux à l'échelle d'un bâtiment, il est nécessaire de connaître les impacts de chaque matériau ou produit le constituant. C'est pourquoi il existe des bases de données qui recensent de façon plus ou moins exhaustive les matériaux du domaine de la construction et y associent les impacts environnementaux correspondants. Cependant ces bases de données s'appuient soit sur des normes différentes, soit proviennent de pays différents, et ne présentent donc pas les mêmes informations. Cette étude permettra également **d'éclaircir le choix d'une base de données.**

### 1.2.2. Choix d'un outil

Pour faciliter l'étude des impacts environnementaux de tout un bâtiment à l'aide d'une base de données, plusieurs logiciels existent. Afin de définir les enjeux relatifs aux impacts environnementaux pour ADP et pour que différents acteurs puissent aisément poursuivre l'étude des impacts environnementaux des projets futurs une fois cette étude achevée, un objectif supplémentaire est **d'aboutir à la sélection d'un de ces logiciels.**

Ce choix, en plus de l'exhaustivité des informations disponibles concernant les impacts, porte principalement sur la facilité d'utilisation du logiciel et sa capacité à réaliser aussi bien des études poussées, que des petits calculs. Il doit permettre de répondre aux exigences d'ADP, comme par exemple "Entre deux solutions architecturales, laquelle sera la plus 'propre' ?", "Quel est le composant ou le type de paroi qui sera le plus générateur d'impacts ?", "Si j'hésite entre tel ou tel produit, lequel sera le plus adapté ? (toute chose égale par ailleurs)".

Une présélection de logiciels a été faite basée principalement sur les différents avis et informations trouvés à ce sujet. Il en est ressorti les trois logiciels suivants : Elodie, Equer, et Cocon.

Elodie a été choisi parce qu'il est associé à la principale base de données française et fait office de référence, ayant été conçu par le CSTB. Equer est un module du logiciel de simulation thermique dynamique Pléiades-Comfie, déjà utilisé par les thermiciens au sein d'ADP, ce qui permet une utilisation simple et a facilité son acquisition. Pour finir, Cocon est un logiciel entièrement programmé sous Excel et qui a attiré notre attention grâce à une vidéo le présentant sur le site LeMoniteur.fr.

Les raisons pour lesquelles d'autres logiciels n'ont pas été retenus sont soit leur coût (TEAM Bâtiment), soit l'inadaptabilité au domaine de la construction et la complexité d'utilisation (Simapro) ou tout simplement leur langue (Ecosoft, Athena).

## 2. Contexte de l'étude

---

### 2.1. Les normes

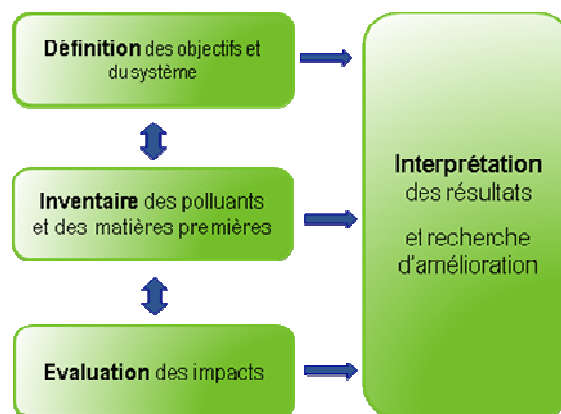
#### 2.1.1. L'ACV – ISO 14040

L'étude à proprement parler des impacts environnementaux s'intitule l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) puisque l'on étudie l'impact d'un produit depuis l'extraction des matières premières, jusqu'à son recyclage, en passant par les différentes phases de transport. Le but est donc de réduire ces impacts à tous les niveaux du cycle de vie.

L'ACV fait l'objet d'une norme ISO et peut être appliquée aussi bien pour un produit que pour un service ou un procédé. Les phases à respecter sont les suivantes :

- **la définition des objectifs et du champ d'étude ;**
- **l'inventaire ;**
- **l'évaluation de l'impact ;**
- **la phase d'interprétation.**

La première phase consiste à délimiter les frontières de l'analyse : jusqu'où remonte-t-on ? Faut-il prendre en compte l'impact de la fabrication des véhicules de transport ? De chaque machine qui participe à l'élaboration du produit ? Mais aussi à définir précisément l'objet de l'analyse : quel produit, quelle quantité... ce que l'on appelle également Unité Fonctionnelle (UF). La seconde phase concerne l'inventaire des flux, à l'intérieur et à l'extérieur du système de l'étude. On distingue deux types de flux, soit économiques (matière, énergie, services...) soit élémentaires, c'est-à-dire échangés avec l'écosphère (matières premières, déchets, émissions...). L'évaluation de l'impact est la phase essentielle puisqu'elle traduit l'inventaire des flux en impacts, clairement définis et quantifiés.



En ce qui concerne les produits de construction, il a été mis en place un système de déclaration qui analyse leur cycle de vie et reprend les trois phases citées précédemment. Il s'agit de la Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES), qui fait l'objet d'une norme française.

#### 2.1.2. Les FDES – NF P01-010

Cette norme précise le contenu de la déclaration des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction, ainsi que les règles et spécifications méthodologiques, et un modèle type de déclaration.

## Règles et définitions

Les différentes étapes prises en compte pour le cycle de vie d'un produit de construction sont les cinq suivantes, toutes incluant la phase de transport qui lui est propre :

- la **production** : de l'extraction des matières premières jusqu'à la sortie du produit manufacturé
- le **transport** : du site de fabrication jusqu'au chantier
- la **mise en œuvre** : de l'arrivée du produit jusqu'à la réception de l'ouvrage
- la **vie en œuvre** : entretiens et réparations durant toute l'occupation
- la **fin de vie** : destruction de l'ouvrage et traitement de fin de vie

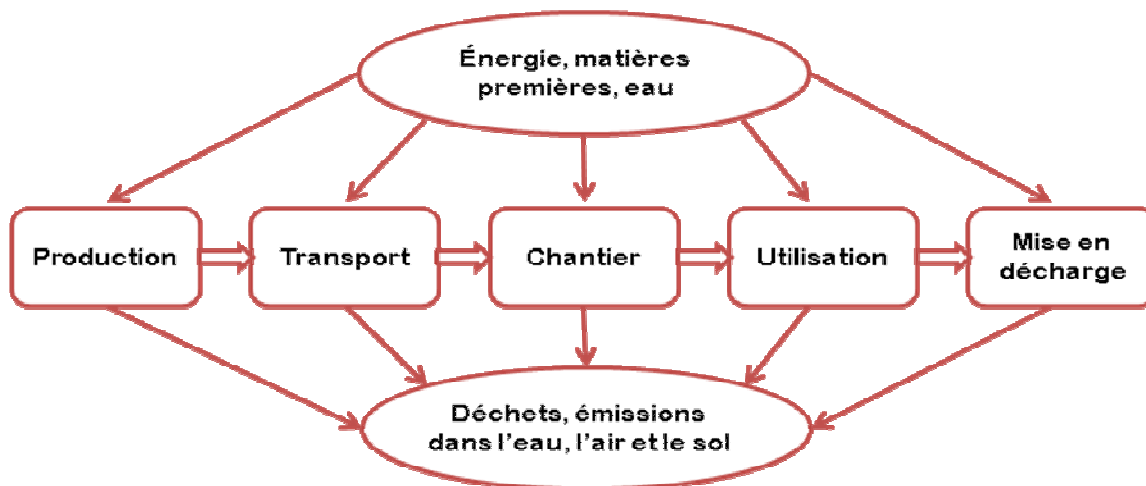
L'UF dépend de l'application visée dans l'ouvrage (m, m<sup>2</sup>, unités par m<sup>2</sup>,...) et doit inclure une dimension temporelle, appelée durée de vie typique (DVT), qui précise la durée pendant laquelle le produit doit assurer sa fonction, qui sera également spécifiée.

L'UF inclut également la quantité en kg de chaque constituant, c'est-à-dire du produit principal mais également des accessoires nécessaires à sa mise en place ainsi que des emballages, et le taux de chute lors de la mise en œuvre et de l'entretien.

Les hypothèses communes à tous les produits de construction concernent l'étape de transport, la fin de vie et le choix des modèles de production d'énergie.

Pour ce dernier, cela signifie qu'il y a une convention sur les consommations énergétiques nécessaires à la fabrication du produit, basée sur le fascicule FD P01-015, qui décrit également les données et la méthode de calcul pour le transport, décrite en annexe. Le scénario de fin de vie quant à lui est considéré par défaut comme étant la mise en décharge du produit.

Afin de définir les frontières de l'ACV, les flux suivants peuvent être omis : l'éclairage et le chauffage des ateliers, le département administratif, le transport des employés, et la fabrication de l'outil de production et des systèmes de transport (machines, camions,...).



Frontières de l'ACV pour les FDES

## Données et indicateurs

La consommation des différentes ressources naturelles énergétiques (Bois, Charbon,...) doit être détaillée, de même que les ressources naturelles non énergétiques (Antimoine, Argent, Argile,...) et ce pour chaque étape du cycle de vie. De la même façon, concernant les flux entrant, il faut spécifier les consommations d'eau (en fonction du lieu de prélèvement) et la consommation d'énergies et de matières récupérées.

Les émissions quant à elles sont réparties par émissions dans l'air, dans l'eau, et dans le sol, avec pour chaque type la quantité d'émissions par polluant (hydrocarbures, CO, CH<sub>4</sub>, cyanure, composés fluorés, cuivre, chrome, plomb...).

Pour finir, les différents types de déchets sont également recensés et quantifiés, qu'il s'agisse des déchets valorisés (récupérés ou transformés en énergie) ou éliminés, selon qu'ils soient dangereux ou non, radioactifs ou inertes.

Toutes ces données permettent alors de calculer les différents indicateurs retenus pour la FDES, restitués de la façon suivante :

<b>Impact environnemental</b>	<b>Unité (par UF)</b>
Consommation de ressources énergétiques énergie primaire totale énergie renouvelable énergie non renouvelable	MJ
Épuisement de ressources	kg équivalent antimoine (kea)
Consommation d'eau totale	litre
Déchets solides déchets valorisés total déchets éliminés déchets dangereux déchets non dangereux déchets inertes déchets radioactifs	kg
Changement climatique	kg équivalent CO <sub>2</sub>
Acidification atmosphérique	kg équivalent SO <sub>2</sub>
Pollution de l'air	m <sup>3</sup>
Pollution de l'eau	m <sup>3</sup>
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC équivalent R11
Formation d'ozone photochimique	kg équivalent éthylène

*Indicateurs d'impacts environnementaux des FDES*

La définition de chaque impact est donnée en annexe.

### **Aspect « sanitaire »**

Les FDES, comme l'indique son nom, contiennent également une partie qui contribue à l'évaluation des risques sanitaires, et également une partie contribuant à l'évaluation du confort.

Les risques sanitaires prennent en compte les éventuelles émissions sources de pollution (COV, CO, CO<sub>2</sub>, poussières, rayonnement,...), la durabilité du matériau (résistance aux UV, aux agents biologiques,...) et la contribution à la qualité sanitaire de l'eau (résistance aux biocides, aux chocs thermiques,...).

L'évaluation du confort regroupe le confort hygrométrique, visuel, acoustique et olfactif.

Ne faisant pas partie des préoccupations premières de cette étude, on ne s'attardera pas sur cette partie des FDES.

### **Rédaction et distribution**

Les déclarations des produits peuvent être soit individuelles, c'est-à-dire que la FDES est le produit d'un seul industriel, mais peut éventuellement inclure plusieurs produits d'une même gamme en la basant sur le produit générant le plus d'impact ; soit collectives, pour un produit-type dont la fonction et les procédés de fabrications proches sont justifiés ; les industries concernées par le produit doivent être citées dans la déclaration. Les déclarations génériques cependant ne sont pas réalisables.

Les fabricants ou les syndicats professionnels souhaitant réaliser une FDES pour leur produit ayant rarement les compétences dans le domaine, elles peuvent faire appel à une société spécialisée qui sera en mesure de réaliser l'ACV. Afin de renforcer la crédibilité de ce travail, les FDES font généralement l'objet d'une vérification par une tierce partie indépendante.

Une grande quantité de FDES se trouve sur la base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des matériaux et des produits de construction dénommée INIES (<http://www.inies.fr>) ; elle est gérée par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Certaines FDES, présentes ou non dans cette base de données, sont disponibles directement sur le site internet des fabricants, alors que pour certaines il faut en faire la demande.

Puisque la base de données INIES est indépendante de la réaction des FDES et que les fabricants ne mettent pas systématiquement leur FDES sur cette base de données, elle ne comprend pas toutes les FDES existantes, même si elle est mise à jour régulièrement. Elle compte actuellement 464 FDES.

## **2.2. Autres bases de données relatives aux ACV**

### **2.2.1. Ecoinvent**

Ecoinvent est une des bases de données d'écobilan les plus connues, puisqu'elle existe déjà depuis une quinzaine d'années. D'origine Suisse, elle comprend des inventaires de cycle de vie pour l'énergie, les matériaux, le traitement de déchets, les trafics et de différents produits et processus (agricoles, électroniques, usinage des métaux et ventilation de bâtiment).

Ainsi, contrairement aux FDES qui fournissent directement l'ACV d'un produit donné, Ecoinvent contient les données qui permettront de réaliser des ACV, donc également des déclarations environnementales, mais aussi des bilans CO<sub>2</sub>, du management de cycle de vie, du design environnementale et d'autres applications encore.

Cependant il n'y a pas d'accès public à cette base de données, puisqu'elle est payante. La dernière mise à jour date de 2003.

Pour gérer plus facilement toutes ces données, qui sont disponibles au format XML ou Excel, il existe par exemple le logiciel Simapro, qui permet de réaliser des ACV relativement rapidement.

### **2.2.2. EPD**

L'EPD (Environmental Product Declaration) est en fait le précurseur européen des FDES, établi sur la norme ISO 14025 (Déclarations environnementales de Type III). Il concerne n'importe quel produit en général, mais est principalement destiné à une communication interentreprises, afin de comparer des produits remplissant la même fonction. Ainsi, l'objectif des EPD est donc d'encourager et de satisfaire la demande pour les produits qui génèrent moins d'impacts sur l'environnement, alors que les FDES ne sont pas une fin en soi, mais doivent servir à l'échelle de tout un ouvrage.

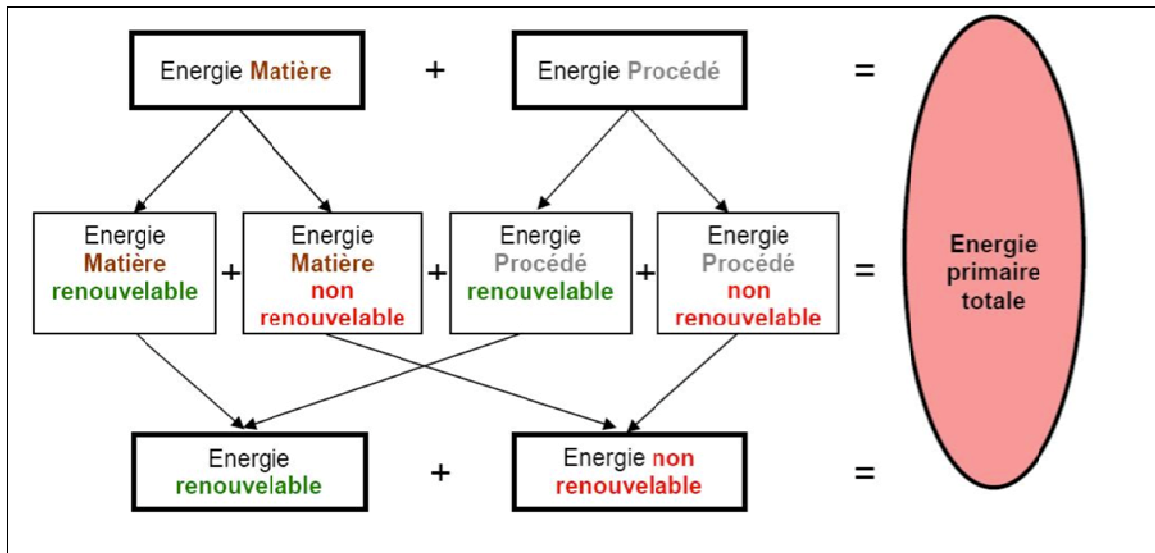
## **2.3. Débats et Problématiques**

Comme tout sujet en cours de développement, qui plus est dans un domaine sensible où il y a différents acteurs en « compétition », de nombreuses critiques apparaissent, dont on peut prendre le parti ou non, alors que des questions peuvent également rester en suspens.

Celles-ci concernent soit les FDES directement, soit plus généralement le concept des ACV.

### **2.3.1. FDES : Energie matière**

L'énergie consommée durant tout le cycle de vie du produit apparaît dans les impacts environnementaux en tant qu'Énergie Primaire Totale. On constate qu'elle est constituée d'énergie primaire renouvelable et d'énergie primaire non renouvelable. Parallèlement l'énergie primaire totale peut également se diviser en énergie matière et en énergie procédé.



*Décomposition de l'énergie primaire totale (source : FCBA, Claire Cornillier)*

L'énergie matière correspond à l'énergie contenue dans la matière, c'est-à-dire l'énergie qu'on peut obtenir en brûlant le matériau, alors que l'énergie procédé (comprendre « énergie du procédé ») est l'énergie à fournir pour transformer le matériau. On comprend alors aisément qu'un produit à base de bois contiendra plus d'énergie matière qu'un produit à base de béton par exemple, et ainsi il en serait de même pour l'énergie primaire totale (en considérant une énergie procédé équivalente).

QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.

Le tableau ci-dessus est extrait d'une FDES concernant une charpente en bois, de la partie d'inventaire des flux. On voit bien le détail des différentes énergies qui constituent l'Énergie Primaire Totale et on a :

- Energie Renouvelable 9098 + Energie Non Renouvelable 4092 = EPT 13185
- Energie procédé 4397 + Energie matière 8790 = EPT 13185

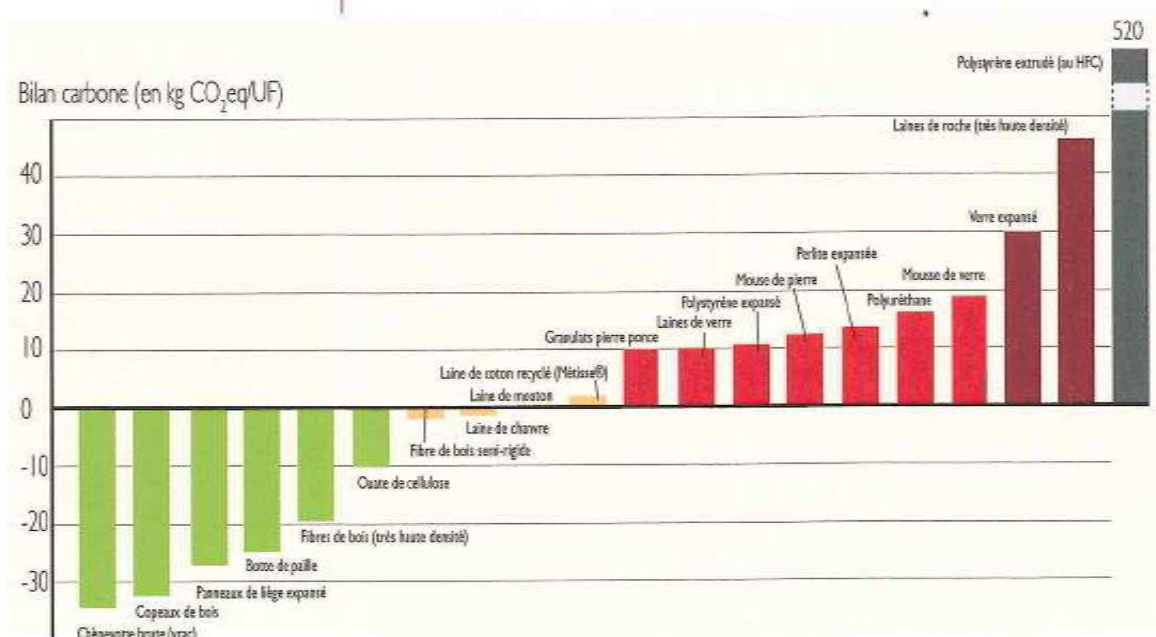
L'énergie matière est donc effectivement calculée lors de la rédaction de la FDES, mais comme on a pu le voir précédemment (p.7), celle-ci n'apparaît pas dans le tableau récapitulatif des indicateurs d'impacts environnementaux, qui sera celui utilisé par les logiciels de calculs d'impacts. C'est pourquoi de nombreuses personnes critiquent ce choix, puisqu'il aura tendance à défavoriser les produits bio-sourcés (d'origine animale ou végétale), qui contiennent plus d'énergie matière et donc plus d'énergie primaire totale, alors que ça n'a pas réellement d'impact négatif, cette énergie pouvant être récupérée en fin de vie du matériau ; ce critère devrait donc, au contraire, améliorer le produit d'un point de vue environnemental.

### 2.3.2. FDES : Stockage du CO<sub>2</sub>

Il est bien connu que les arbres et autres plantes sont capables de stocker du carbone et représentent ainsi un puits de carbone : 1 m<sup>3</sup> de bois peut contenir jusqu'à 1 tonne de carbone. Ceci a pour principal effet de limiter la présence de CO<sub>2</sub> dans l'air, qui contient environ 30% de carbone. Une fois transformés, les produits ainsi obtenus continuent de stocker ce carbone. Il a alors été convenu que la quantité de CO<sub>2</sub> pouvant être emmagasinée dans les produits de construction originaires de la biomasse sera déduite du total des émissions de gaz à effet de serre. On peut ainsi trouver des valeurs négatives de « Changement climatique » pour les produits à base de bois.

Ce choix pourrait paraître incohérent si l'on considère qu'en fin de vie le produit est brûlé ou stocké, et donc à un moment ou à un autre tout le CO<sub>2</sub> sera relâché. Cependant si l'on prend le cas des produits en bois, issus de forêts gérées durablement, d'autres arbres seront plantés et pourront ainsi à nouveau stocker du carbone. Globalement le bilan est alors neutre.

Ce point-là suscite peu de controverse, mais il est nécessaire de le citer puisque toutes les bases de données n'intègrent pas nécessairement l'idée de stockage du CO<sub>2</sub>.



« Bilan CO<sub>2</sub> » de 1 m<sup>2</sup> de divers isolants pour une épaisseur correspondant à une résistance thermique de 5 m<sup>2</sup>K/W.

Source : L'Isolation Thermique Ecologique, J-P Oliva

### 2.3.3. FDES : Transport

Bien que le calcul des impacts dus au transport soit fait de manière précise (cf Annexes) selon la distance, la quantité de produit transporté, et la charge réelle dans le camion, une valeur indicative de 30km est donnée pour la distance du lieu de production au chantier, pouvant être modifiée ou non par l'industriel. Ceci implique un déséquilibre entre les fabricants qui choisissent d'utiliser une valeur plus réaliste et ceux qui ne le font pas.

Quelque soit la distance utilisée, les logiciels actuels ne permettent pas de modifier cette valeur, qui ne correspond pas nécessairement à notre cas.

### 2.3.4. FDES : Déchets

Les FDES sont également critiquées au niveau de la prise en compte des déchets.

Dans un premier temps, bien que les quantités des différents types de déchets soient détaillées, le fait que le scénario de fin de vie par défaut soit la mise en décharge limite au niveau énergétique mais également environnemental.

Un matériau qui sera effectivement mis en décharge devrait être pénalisé contrairement à un matériau qui pourrait effectivement être valorisé, que ce soit par refonte ou non. Par ailleurs, un matériau recyclé sans refonte serait théoriquement plus gourmand d'un point de vue énergétique et économique (travail de démontage et de tri, lieux de stockage, salariés,...) alors que d'un autre côté il permet la diminution de l'épuisement des ressources et est plus intéressant d'un point de vue environnemental qu'un déchet incinéré ou enfoui.

Dans un deuxième temps, il n'existe pas d'indicateur pour la biodégradabilité des matériaux. En supposant effectivement que tous les matériaux sont mis à la décharge en fin de vie, il semblerait tout de même raisonnable de valoriser les matériaux qui sont biodégradables, contrairement aux matériaux inertes ou dangereux.

Enfin, dans beaucoup de cas, même s'il l'on sait qu'il est possible de recycler ou valoriser certains déchets, les filières le permettant sont inexistantes ou très éloignées.

Prendre en compte tous les scénarii de fin de vie existants serait alors relativement complexe, non seulement de par leur diversité, mais également de par la complexité à évaluer les impacts environnementaux. Il faut donc pouvoir rester conscient de l'éventuelle recyclabilité et valorisation de certains déchets lorsque l'on veut faire un choix entre différents produits.

### 2.3.5. Produits étrangers

Sans que cela soit une critique adressée directement aux FDES, du fait qu'il s'agisse d'une norme française, les produits étrangers fabriqués à l'étranger ne seront pas représentés dans la base de données. Or lorsqu'il s'agit de projets importants et spécifiques, il arrive souvent que des produits provenant de l'étranger soient utilisés. La question est donc de savoir quel type de données utiliser lors de l'étude des impacts environnementaux de l'ouvrage. Utiliser la FDES d'un produit équivalent semble délicat, puisque non seulement un même type de matériau peut avoir des impacts différents selon le fabricant, mais aussi l'étape de transport sera négligée. La solution d'utiliser la base de données du pays en question paraît elle aussi limitée, puisque les scénarii et les modes de calculs utilisés pour les différentes bases de données ne sont pas les mêmes.

Choisir l'une ou l'autre solution, en fonction des données disponibles, nécessite alors de garder un œil critique sur les résultats, et d'éventuellement les corriger dans la mesure du possible.

### 2.3.6. Equipements

L'évaluation des impacts environnementaux étant une pratique émergente, et sachant que les FDES ne concernent que les produits de construction, on peut en venir à se demander ce qu'il en est des équipements dans les bâtiments. Sans aller jusqu'aux meubles, aux appareils électroménager ou objets de décoration, les équipements techniques notamment concernant le domaine CVC (Chauffage-Ventilation-Climatisation) ou l'éclairage peuvent devenir non négligeable. Notamment dans le domaine tertiaire, d'autant plus que les matériaux les constituants sont généralement très impactants, tels que l'acier, l'aluminium ou le cuivre.

L'industrie électrique par exemple a fait la démarche de créer ses propres fiches de déclaration, les PEP (Profil Environnemental de Produit), basées sur la Déclaration de type III (ISO 14025). Afin de pouvoir faire des études complètes sur les équipements il est nécessaire que les autres industries (chauffage/rafraîchissement, ventilation,...) décident également de produire des déclarations.



Les équipements n'ont pas fait l'objet d'une étude dans ce rapport. Cependant d'après les résultats présentés par O.Sidler lors de sa formation, les équipements pourraient représenter 20 à 30% de l'énergie grise.

Il est évident que des produits tels que les gaines de ventilation ne peuvent pas être fabriqués à partir d'autres matériaux tel que le bois par exemple. Par contre il est possible d'optimiser les systèmes par exemple en choisissant des types de distribution différents ou en optimisant le placement des équipements de production.

On peut noter également l'impact que peuvent avoir les fluides frigorigènes, très émissifs en CO<sub>2</sub>. En effet, il faut savoir que 1 kg de fluide frigorigène type R410a = 1975 kgCO<sub>2</sub>. Ainsi les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux fuites de fluides frigorigène peuvent représenter 43 à 90% de la part totale (fuites + émissions dues aux consommations de climatisation).

### 3. Présentation et comparatif des logiciels

Afin d'évaluer les impacts environnementaux d'un ouvrage, il existe différents logiciels dont le fonctionnement est équivalent dans le principe : indiquer les matériaux et leur quantité utilisés dans l'ouvrage, et le programme calcule les impacts en fonction de la base de données intégrée. L'objectif est donc de choisir un logiciel adapté aux besoins d'ADP parmi une présélection de programmes, dont le choix a été expliqué précédemment.



#### 3.1. ELODIE

##### 3.1.1. Entrées, utilisation - fonctionnement

ELODIE, développé par le CSTB, est utilisable directement en ligne, sur le site [www.elodie-cstb.fr](http://www.elodie-cstb.fr), après avoir entré un identifiant et un mot de passe. Une version de démonstration gratuite est accessible par simple demande, il s'agit de celle utilisée dans cette étude, puisqu'actuellement elle est encore mise à jour, mais possède quelques fonctionnalités en moins par rapport à la version finale, fonctionnalités qui n'auraient pas eu de rôle dans le choix de notre outil (i.e. préciser les consommations électriques et en eau, qu'il faut calculer séparément).

L'interface est simple d'utilisation, il suffit de créer un ou plusieurs bâtiment(s) (qui représentent les différents scénarios possibles du projet), d'en lister les composants (en les classant par zone ou non) à partir de la base de données, et de préciser leur quantité en fonction de l'UF. Il est possible de créer plusieurs bâtiments afin de pouvoir les comparer.

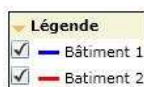
##### 3.1.2. Base de données

Etant couplé avec la base de données INIES, ELODIE utilise directement les FDES. Il y a ainsi une certaine garantie de la disponibilité et de la mise-à-jour de la base de données. Il est donc également possible d'avoir accès directement aux informations contenues dans la FDES, sans devoir passer par le site INIES.

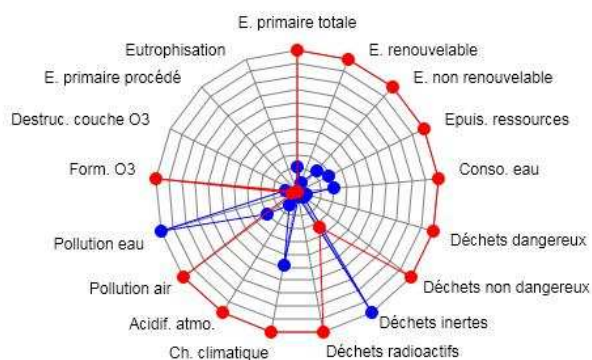
A noter qu'il est également possible de créer ses propres fiches.

##### 3.1.3. Sorties

Les résultats se présentent principalement sous la forme de radar, comme on peut le voir ci-dessous.



Répartition des impacts annuels pour chaque bâtiment



Radar des 12 indicateurs d'impact sous Elodie

Ce radar permet de comparer les différents bâtiments d'un même projet. On peut également obtenir, ainsi qu'au niveau de chaque zone, un tableau détaillé des différents impacts environnementaux.



## 3.2. COCON

### 3.2.1. Entrées, utilisation – fonctionnement

Cocon est un programme entièrement réalisé sous Excel. Dans le même esprit qu'Elodie, on divise dans un premier temps le projet par bâtiments. Ensuite il ne s'agit pas de décrire le bâtiment pas zones, mais par type de parois. Six familles de parois existent, à savoir : Aménagements et Cloisons, Couvertures, Dalles et Planchers, Fondations et Soubassements, Huisseries et Fermetures, Murs. Dans chacune de ces familles il est alors possible de créer un certain nombre de parois, que l'on décrit tout simplement par les couches successives de la paroi en question (à partir des matériaux de la base de données), en considérant un m<sup>2</sup> de paroi et en précisant alors l'épaisseur de chaque matériau.

MENU Aide		MUR	Quantités ou épaisseurs	
Parois		Parpaing + Isol intérieure LV + P. Plâtre	(pour 1m <sup>2</sup> de paroi)	
Bâtiments			Unité	Qté / ep
Sources	Couches de l'extérieur vers l'intérieur de la paroi (sur 1 m <sup>2</sup> )			
[54][58][98]	Enduit de ciment - 1 900 kg/m <sup>3</sup> λ:0,800	cm	2	
[1]	Parpaing de ciment - 1 185 kg/m <sup>3</sup> λ:0,952	cm	20	
[1][21]	Laine verre ISOVER IFR Contact 220 mm - 11 kg/m <sup>3</sup>	cm	15	
[1][88]	Plaque PlacoPremium® BA13 - 876 kg/m <sup>3</sup> λ:0,250	cm	1,3	
	Éléments ponctuels non pris en compte dans les calculs thermiques (pour 1 m <sup>2</sup> )			
[98]	Ossature métallique pour cloison en plaques de	U	1	

Composition d'une paroi sous Cocon

Il suffit ensuite de préciser la quantité de surface de chaque paroi présente dans la variante concernée.

Il est aussi possible de comparer directement des produits de construction en leur assignant un critère commun, comme par exemple une même résistance ou une même quantité.

Certaines fonctions thermiques sont également présentes, comme la possibilité de comparer les performances thermiques des parois aux recommandations d'un label (représentées alors par une fourchette de valeurs), ou encore d'estimer l'inertie d'une zone thermique (Légère, Moyenne, Lourde...) en spécifiant les parois de cette zone et leur surface.

Tout comme dans la version finale d'Elodie, il est possible de rentrer des valeurs de consommations en eau, chauffage, rafraîchissement, éclairage et autres, calculées séparément. Ce qui permet de comparer l'énergie primaire totale de construction et celle d'occupation du bâtiment.

Pour finir on peut également prendre en compte les déplacements des occupants du bâtiment en précisant leur nombre, le site du bâtiment (Hypercentre, Banlieue, Petite Ville...) qui va influencer sur la part des différents types de transport utilisés, et le nombre de jours d'utilisation du bâtiment par an. L'énergie utilisée pour alors être comparée à l'énergie primaire de construction et à celle d'occupation du bâtiment.

### 3.2.2. Base de données

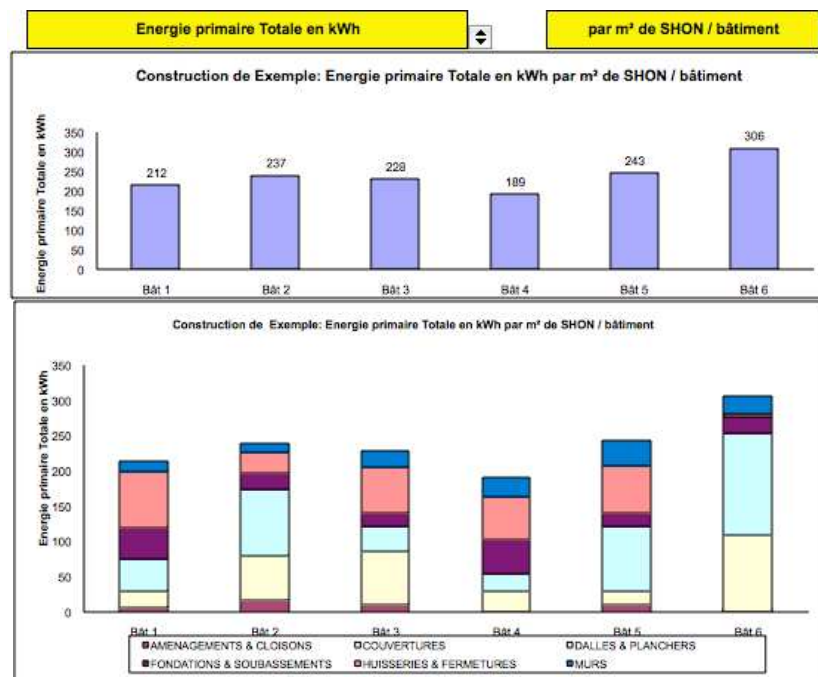
La particularité de Cocon réside dans le fait que son auteur constitue sa propre base de données. Les FDES de la base INIES représentent la première source, mais elle contient également des FDES récupérées directement chez le fabricant ou les organismes de matériaux, ce qui implique une base de données plus importante qu'INIES. A cela s'ajoute quelques données suisses, mais également des valeurs interpolées.

Par soucis de transparence, à côté de chaque matériau utilisé est précisé la source dont il est issu (dans le format [1], comme on peut le voir sur la figure ci-dessus), et l'on peut généralement cliquer dessus pour accéder directement à la FDES en question ou au site internet du fabricant ; la liste complète des sources utilisées est consultable directement dans le programme. Au total, la base de données est constituée d'environ 745 produits, et est régulièrement mise à jour.

### 3.2.3. Sorties

Non seulement les façons de visualiser les résultats, mais également les types de résultats existants sont multiples.

Pour commencer, les impacts environnementaux présentés sont ceux des FDES. Le classique radar des 17 impacts fait donc parti des résultats visualisables. Il est également possible de comparer entre les variantes de bâtiment chaque impact séparément, soit par surface totale, par m<sup>2</sup> ou par m<sup>2</sup> par an. Ce résultat est également visualisable en distinguant les différentes familles de parois.

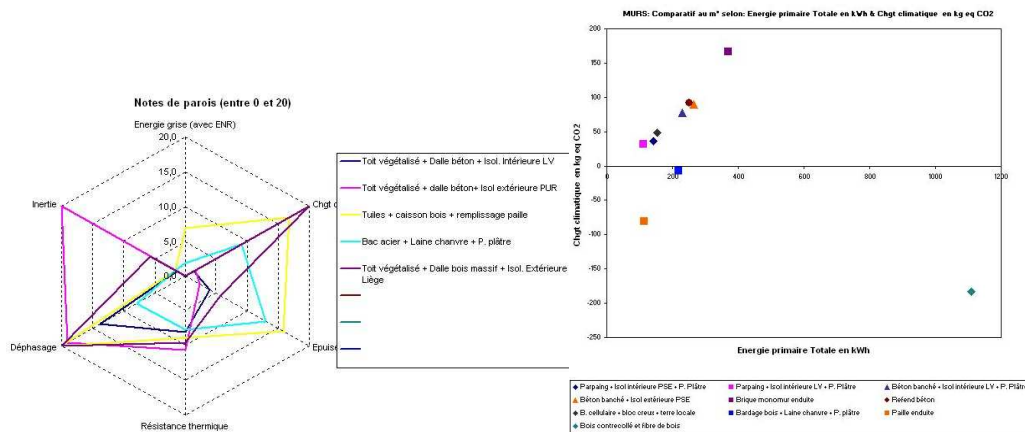


Comparaisons sous Cocon des différentes variantes pour un critère

On peut également comparer les résultats selon deux critères, l'un en abscisse et l'autre en ordonnée.

En plus de ces 17 impacts, l'auteur de Cocon a créé ses propres « notes », qui concernent l'Energie grise (i.e. dans ce cas l'Énergie Primaire Totale), le Changement climatique, l'Épuisement des ressources, la Résistance thermique, le Déphasage et l'Inertie. Le calcul de ces notes est détaillé en Annexe.

Ensuite, il est non seulement possible de faire ces comparaisons entre les différentes variantes de bâtiment créées, mais également entre les différentes parois, en choisissant la famille de parois concernée. Pour une paroi en particulier on peut aussi observer la part des différents matériaux la composant pour un critère en particulier.



QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.

### Différents types de résultats visualisables sous Cocon

Pour finir, les caractéristiques thermiques de chaque matériau étant données, on obtient alors directement la conductivité et la résistance thermique de la paroi, mais également son inertie et son déphasage. Les notes associées sont également affichées, et l'on peut voir à quelle performance thermique la paroi appartient, en précisant le type de paroi dont il s'agit (mur extérieur, toiture,...). A noter qu'il est possible de ne pas prendre en compte dans le calcul thermique certains matériaux ponctuels comme par exemple des poteaux ou des poutres, le calcul de la résistance ne prenant pas en compte ces ponts thermiques.

QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.

QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.

Résultats observables sous Cocon pour chaque paroi créée

### 3.3. EQUER

#### 3.3.1. Entrées, utilisation – fonctionnement

Equer est un module du logiciel de Simulation Thermique Dynamique (STD) Pléiades-COMFIE (que l'on appellera Comfie), développé par Izuba énergies en partenariat avec l'école des Mines de Paris. L'utilisation d'Equer est alors très simple puisqu'il suffit d'ouvrir un fichier de simulation préalablement créé avec Comfie, et renseigner certains paramètres, notamment concernant l'énergie utilisée, l'eau, les déchets, et le transport. Ces paramètres sont surtout utiles si l'on veut faire l'ACV complète du bâtiment (impacts environnementaux + consommations dues à l'occupation).

Le bâtiment est donc dans un premier temps décrit avec Comfie, à partir de sa base de données propre, qui est axée sur les caractéristiques thermiques des matériaux. A chaque fois que l'on voudra modifier un matériau ou une paroi, il sera alors nécessaire de relancer une simulation complète. Une telle simulation nécessite également de préciser les différents scénarios nécessaires à la STD (occupation, température, ventilation,...).

Si l'on veut créer plusieurs variantes il faut alors créer plusieurs fichiers Comfie.

#### 3.3.2. Base de données

Equer propose une liste de matériaux, directement affichée et consultable, dont les valeurs d'impact sont issues d'Ecoinvent. Il s'agit alors de matériaux génériques (par exemple Laine de verre, Polystyrène, Peinture, etc). De plus, ces matériaux n'étant pas liés à ceux de Comfie, il est alors nécessaire d'établir une correspondance entre les matériaux utilisés dans Comfie et ceux présents dans la liste d'Equer.

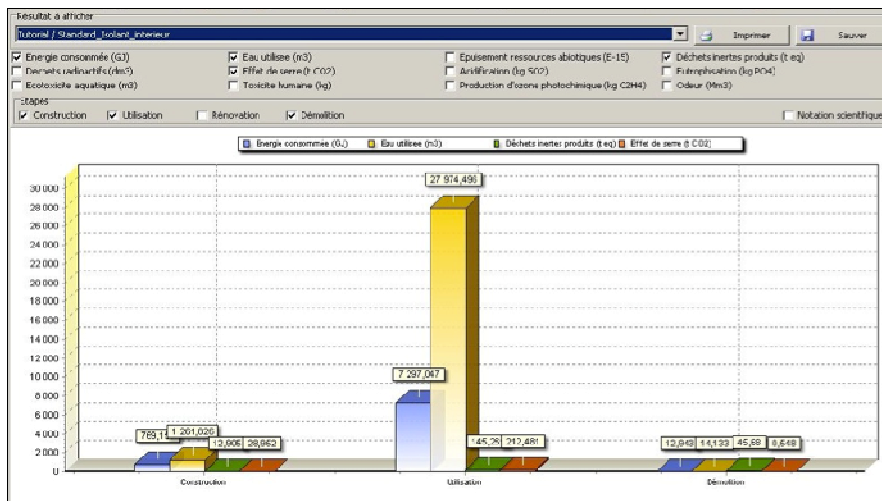
Pour des raisons de prix de la base de données, qui se répercuterait alors sur le prix du programme, les valeurs issues d'Ecoinvent sont celles de 1996, et non de 2003. Il n'est pas possible de savoir pour le moment si celle-ci sera utilisée dans les temps à venir ou non. La base de données d'Equer ne subit ainsi aucune mise-à-jour.

Les différents impacts sont les suivants :

Impacts	Unités	Définition
Energie consommée	GJ	Energie primaire totale incluant l'occupation du bâtiment (+transport occupants)
Eau utilisée	m <sup>3</sup>	cf FDES
Epuisement ressources abiotiques	E-15	Epuisement des ressources non renouvelables (prend également en compte l'utilisation d'énergies renouvelables produites localement)
Déchets inertes produits	t eq	= déchets inertes + déchets dangereux ou non des FDES
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	cf FDES
Effet de serre	t CO <sub>2</sub>	cf FDES (Changement climatique)
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	cf FDES
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub>	Apport de substance jouant le rôle d'engrais dans les eaux de surface et qui entraîne une surcroissance des algues
Ecotoxicité aquatique	m <sup>3</sup>	Volume d'eau polluée
Toxicité humaine	kg	Quantité de polluant reçue par un individu qui aura un effet sur sa santé
Production d'ozone photochimique	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	cf FDES
Odeur	m <sup>3</sup>	Volume d'air malodorant, d'odeur équivalente à une concentration de 1kg/m <sup>3</sup> d'ammoniac

### 3.3.3. Sorties

Les résultats sous Equer se présentent soit sous la forme d'un radar (visualisable également sous forme de barres), avec tous les impacts, soit d'un graphique où l'on peut choisir les différents impacts à faire apparaître, et les différentes phases (Construction, Utilisation, Rénovation, Démolition). Seul le radar permet de comparer différentes variantes, comme dans Elodie ou Cocon.



Résultats sous Equer

## 3.4. Premières conclusions

### 3.4.1. Concernant les logiciels

Bien qu'Elodie soit une application directe des FDES, qui semblent être une des sources de données les plus prometteuses, elle s'en trouve cependant limitée. En effet toutes les FDES produites par les industriels ne sont pas systématiquement intégrées dans la base INIES, ce qui limite les produits disponibles. S'ajoute à cela le peu de possibilités concernant l'étude des résultats. **Il a ainsi été décidé d'exclure Elodie des études qui suivent.** Equer quant à lui, bien que l'étude des résultats soit également limitée, semble intéressant du fait qu'il est dans la continuité de Comfie et intègre alors l'énergie d'utilisation du bâtiment ; de plus il sera intéressant d'observer les résultats provenant de deux bases de données différentes (Ecoinvent pour Equer et principalement FDES pour Cocon).

### 3.4.2. Concernant les indicateurs

Etant donnée la quantité importante d'indicateurs, et parce que sous Cocon toutes les valeurs ne sont pas spécifiées pour certains matériaux, ce qui impliquerait des erreurs pour certains indicateurs, il a été décidé de **prendre en compte uniquement l'"Energie primaire totale" et le "Changement climatique"** (ou « effet de serre » sous Equer) dans toutes la suite de l'étude ; d'autant plus que les indices d'impacts environnementaux ne sont pas tous identiques entre les deux programmes Equer et Cocon. Ce choix s'explique également du fait que l'énergie primaire et les émissions de CO<sub>2</sub> sont deux grandeurs plus facilement appréhendées puisqu'elles font l'objet d'études aussi bien pour les consommations d'occupation d'un bâtiment, que pour bien d'autres domaines (industrie, transport,...).

Il sera tout de même nécessaire de vérifier sur les différents produits utilisés que certains indicateurs n'aient pas un résultat rédhibitoire, comme par exemple la toxicité pour l'amiante, alors que son bilan énergie et CO<sub>2</sub> est tout à fait intéressant.

Il aurait été intéressant de n'étudier que l'énergie primaire non renouvelable, plutôt que l'énergie primaire totale – qui implique que l'on pénalise en quelque sorte l'énergie primaire issue d'énergies renouvelables – mais comme cela a déjà été dit, les matériaux non directement issus de FDES ne présentent pas systématiquement cette valeur, et Equer n'en propose tout simplement pas la distinction. Cependant, si l'on observe que cette valeur est disponible dans tous les produits que l'on utilise lors de l'évaluation d'un projet, on privilégiera cet indicateur, plutôt que l'énergie primaire totale.



## 4. Etude de projets existants : CE de Roissy et SSLIA de Roissy

---

### 4.1. CE de Roissy

#### 4.1.1. Rôle du bâtiment

Le bâtiment du CE est destiné à recevoir aussi bien les locaux d'activités, comme par exemple les arts plastiques, le modélisme ou le patchwork, mais aussi les bureaux, que ce soit les bureaux pour recevoir le public ou les bureaux administratifs. S'ajoute à cela une salle polyvalente d'environ 170 m<sup>2</sup>. L'ouvrage dans son ensemble a une surface (SHON) d'environ 1280 m<sup>2</sup>, dont 250 m<sup>2</sup> en étage.

La spécificité du bâtiment est qu'il est entièrement en structure bois, mis à part la dalle et les parois de l'ascenseur, qui servent de contreventement.

Concernant les sources d'énergie, le chauffage et le rafraîchissement au RDC sont assurés par des planchers chauffant/refroidissant, et uniquement chauffant à l'étage pour des raisons d'avis technique concernant la construction en bois. A l'étage le froid est acheminé via la ventilation. Ces deux énergies proviennent d'une pompe à chaleur (PAC) air-eau. Elle est complétée par un système double-flux qui permet de récupérer la chaleur de l'air extrait afin de préchauffer l'air entrant.

L'étude est réalisée pour une durée de vie du bâtiment de 30 ans.

Le **choix de la durée de vie a un impact** non seulement sur les consommations liées à l'occupation du bâtiment, mais également sur le taux de renouvellement des matériaux qui ont leur durée de vie propre. Dans notre cas cela n'aura pas d'influence car la quasi-totalité des matériaux utilisés ont une durée de vie minimum de 30ans.



#### 4.1.2. But de l'étude – Variantes

Bien que le projet soit déjà en cours de construction, le but de l'étude est dans un premier temps de prendre les logiciels Equer et Cocon, en appliquant un projet concret qui ici est alors facilité par le fait qu'on connaisse exactement les matériaux et leur quantité ; dans un deuxième de pouvoir travailler avec des matériaux bois qui sont sujet à controverse dans les FDES.

Pour pouvoir alors avoir un point de comparaison, une variante « béton » a été créée en prenant comme modèle des bâtiments de bureau d'INA (657-658). Cette variante est basée sur le fait que les deux variantes ont la même performance thermique (même conductivités thermiques des parois).

L'intérêt est de vérifier qu'une construction en bois ne génère pas plus, voire moins d'énergie primaire et de CO<sub>2</sub> qu'un bâtiment classique, mais également qu'il n'y a pas d'impact concernant la consommation d'énergie lors de l'occupation du bâtiment.

L'étude des consommations se fera avec Comfie, ce qui permet de faire l'ACV avec Equer par la suite. De plus le bâtiment une fois construit avec Comfie (à l'aide d'un programme nommé Alcyone, qui permet d'importer des plans), la saisie des parois et des surfaces avec Cocon s'en trouve facilitée, puisque ces dernières sont listées pour chaque composition de paroi.



### 4.1.3. Composition et matériaux – Cocon

Non seulement le fait que ce genre d'exercice ne soit pas usuel, mais qu'en plus certains matériaux aient pu encore être modifiés en cours de projet, implique qu'il n'existe pas de document indiquant clairement quels produits ont été utilisés ni les compositions des parois. Il a donc été nécessaire de parcourir la base de données des documents existants concernant le projet, et principalement les fiches des produits (fiches fournies par les entreprises) afin de recenser les produits utilisés. La composition des parois a été retrouvée soit à travers les documents soit en demandant aux architectures ou ingénieurs structure qui ont travaillé sur le projet.

Plus globalement le bâtiment est constitué de la façon suivante :

- ossature et structure : poutres en bois lamellé-collé
- parois extérieures : elles sont constituées de panneaux structurels en bois, isolés par l'extérieur à l'aide de fibre de bois, elle-même recouverte par un bardage bois
- parois intérieures : constituées dans l'ensemble de panneaux en bois plus ou moins épais, complétés par un complexe isolant + plaque de plâtre
- plancher bas : dalle de béton isolée par en dessous, suivie par le complexe de plancher chauffant, lui-même recouvert par une finition (peinture, PVC, carrelage...)
- planchers intermédiaire : panneaux de bois recouvert du complexe de plancher chauffant, avec en dessous soit un isolant acoustique, soit un faux plafond (dalle de bois ou de plâtre)
- toiture : panneaux de bois auxquels vient s'ajouter l'isolation et l'étanchéité, recouverte de gravillons ou de végétalisation
- ouvertures : les portes et les fenêtres sont à châssis alu
- aménagements sols : carrelage, PVC

En ce qui concerne la variante « béton », les modifications sont les suivantes :

- ossature et structure : poutrelle acier et poteaux béton
- parois extérieures : bardage double peau + isolation laine de verre et plaque de plâtre
- parois intérieures : parpaings et carreaux de plâtre
- planchers intermédiaires : dalle alvéolée en béton précontraint
- toiture : dalle alvéolée en béton précontraint

Les épaisseurs d'isolants ont été définies de sorte que les valeurs de conductivité thermique pour chaque paroi soient les mêmes qu'en version de base.

Dans la présentation des résultats par familles de parois obtenus à l'aide de Cocon, les différentes parois sont classées de la façon suivante : (le classement a été tributaire du nombre de parois que l'on peut créer pour chaque famille)

	<b>Bois</b>	<b>Béton</b>
<b>Aménagements &amp; Cloisons</b>	Cloisons légères, parois ascenseur, aménagements (peinture...)	Cloisons légères, parois ascenseur, aménagements (peinture...)
<b>Couvertures</b>	Toitures	Toitures
<b>Dalles &amp; Planchers</b>	Dalle, planchers, fondations	/
<b>Fondations &amp; Soubassements</b>	/	Dalle, planchers, fondations
<b>Huisseries</b>	Vitrages	Vitrages
<b>Murs</b>	Parois extérieures et intérieures	Parois extérieures et intérieures

#### 4.1.4. Simulation et scénarios – Comfie

Comfie est un logiciel de Simulation Thermique Dynamique. Son intérêt est d'étudier le comportement thermique d'un bâtiment sur une période donnée grâce à un fichier météo qui contient des valeurs de température, d'ensoleillement et de vent d'un site sur une année type. On peut ainsi suivre les variations de température à l'intérieur du bâtiment mais également les besoins en chaud ou en froid résultants en assignant une température de consigne. Cette méthode est à distinguer de celle utilisée pour le dimensionnement des équipements techniques.

Les principales informations à saisir sous Comfie sont les suivantes :

- les compositions de parois : matériaux et épaisseurs
- les zones ou les pièces, suivant le degré de précision : parois, surfaces, orientation, contact, ponts thermiques, ouvrants
- les scénarios : occupation, consigne de température, puissance dissipée, pourcentage d'occultation, pourcentage de ventilation
- le fonctionnement : quel scénario pour quelle zone ou pièce, les ventilations internes
- l'environnement : fichier météo, horizon et masques proches.

Une fois toutes les données renseignées, il suffit de lancer la simulation, qui dure entre 1 et 3min, pour obtenir les résultats.

Le bâtiment du CE a été divisé en 5 zones : activités, salle polyvalente, bureaux, locaux techniques, local PAC, circulations.

Les scénarios créés sont basés sur les conditions intérieures à garantir définies par le lot CVC du CCTP. Ces conditions servant à dimensionner les systèmes, elles ont été revues afin d'être plus réalistes.

	Consigne de température (°C)		Occupation (pers.)	Puissance dissipée (W/m <sup>2</sup> )		Ventilation (m <sup>3</sup> /h)	
	Été	Hiver		Eclairage	Autre	Air neuf	Infiltrations
<b>Activités</b>	26	20	26	6	/	650	422
<b>Bureaux</b>			18		9	450	607
<b>Salle Polyvalente</b>			53		/	1325	179
<b>Circulations</b>	/	12	/	/	/	102	
<b>Locaux tech</b>			/	/	/	43	
<b>PAC</b>			/	/	186	10	

Les valeurs de ce tableau représentent les valeurs maximales possibles dans certains cas (occupation, ventilation). Les scénarios horaires hebdomadaires peuvent être trouvés en annexe. Le même scénario a été appliqué tout au long de l'année.

L'air neuf est calculé pour un débit de 25m<sup>3</sup>/h.pers pour les pièces de bureau, d'activités et la salle polyvalente, et de 1 vol/h pour le local PAC. On suppose que le système double-flux a une efficacité de 70%. Les débits d'air neuf sont donc tous multipliés par 0,3 afin d'obtenir le débit d'air réel qui aura besoin d'être chauffé. Les infiltrations sont de 1.7m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h pour toutes les zones, en considérant la surface des murs extérieurs.

Le fichier météo qui a été choisi est celui de la ville de Trappes (78), étant le plus proche de Roissy parmi les fichiers disponibles.

Les mêmes scénarios ont été utilisés pour la variante Béton.

## 4.2. SSLIA de Roissy

### 4.2.1. Rôle du bâtiment et stade du projet

Le SSLIA de Roissy est constitué d'une remise, d'une base vie et d'une vigie. La remise permet le stationnement et la maintenance des véhicules, sur une surface d'environ 640 m<sup>2</sup>. La base vie regroupe toutes les commodités nécessaires aux pompiers étant de permanence, avec des chambres, des vestiaires, une cuisine et une salle de repos ; on y trouve également un bureau, une salle de formation et une salle de musculation. Le tout est réparti sur deux étages et une surface de 516 m<sup>2</sup>. Enfin, la vigie, située en toiture de la base vie, offre une vue sur les pistes à 360° et permet le contrôle de la plateforme.

Le chauffage et le rafraîchissement des locaux sont assurés par un système VRV (Volume de Réfrigérant Variable ou encore système à détente directe) qui adapte sa puissance en fonction des besoins thermiques des différentes zones. De plus il s'agit d'un système « 3 tubes » qui permet de chauffer et refroidir simultanément plusieurs pièces selon les besoins de chacune. Enfin, on notera également la présence d'un système de ventilation double-flux.

L'étude sera réalisée pour une durée de vie du bâtiment de 30 ans.



### 4.2.2. But de l'étude – variantes

A nouveau, l'intérêt de prendre le projet d'un bâtiment achevé est d'avoir accès à toutes les informations concernant sa construction. Un autre bâtiment de SSLIA étant à l'étude pour la plateforme d'Orly, différents niveaux de performance thermiques sont actuellement étudiés, selon le label que l'on souhaiterait atteindre. Ainsi le but de cette étude est de récupérer ces scénarios de performance (valeurs de U, performance des vitrages, perméabilité...) et de les appliquer au bâtiment SSLIA de Roissy.

Il sera ainsi possible de comparer l'énergie primaire totale de construction de chaque scénario avec l'énergie primaire des consommations correspondantes, et ainsi d'évaluer la part de cette première lorsque l'on améliore les performances d'un bâtiment.

La variante de base sera le bâtiment SSLIA de Roissy, ayant une performance RT 2005. Les autres variantes seront BBC, BEPAS, et BEPOS (Bâtiment à Energie Passive et Bâtiment à Énergie Positive).

		RT 2005	BBC	BEPAS	BEPOS
<b>Conductivités thermiques (W/m<sup>2</sup>.K)</b>	Murs extérieurs	0,36	0,2	0,15	0,13
	Plancher haut sur terrasse	0,2	0,18	0,13	0,12
	Plancher bas sur terre pleine	0,45	0,2	0,15	
	Fenêtres (Uw)	2,48	1,5	1,1 et 0,7 au nord	1 et 0,7 au nord
<b>Ponts thermiques</b>	Plancher bas	0,5 W/m.K	0,3 W/m <sup>2</sup> SHON.K	/	
	Plancher intermédiaire	0,75 W/m.K			
	Plancher haut				
<b>Perméabilité à l'air (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h)</b>		1,7	1	0,28	0,28

### 4.2.3. Composition et matériaux – Cocon

Le bâtiment SSLIA de Roissy a une structure béton mais comporte également beaucoup de parois à base d'acier ; dans l'ensemble, les différentes parois sont les suivantes :

- structure remise : poutrelles acier
- murs extérieurs remise + mur nord base vie : bardage double peau (bardage aluminium + isolant/structure acier + plateau acier)
- toiture remise : couverture acier + isolant + étanchéité
- mur est base vie : béton armé + isolant + bardage aluminium (cassettes)
- façade sud base vie : une partie vitrage + une partie cassette alu et isolant
- toiture base vie : béton armé + isolant + étanchéité + gravillons
- façades vigie : vitrage + allège béton-isolant-alu
- murs intérieurs : béton armé, parpaings (plein, creux, 15 ou 20), cloisons légère (plâtre-isolant acoustique-plâtre)
- aménagements sols : carrelage, PVC, peinture
- ouvrants : portes et fenêtres à châssis alu

Concernant les différentes versions, la structure est la même, seule l'épaisseur des isolants sera différente ainsi que les performances des vitrages.

Dans la présentation des résultats par familles de parois obtenus à l'aide de Cocon, les différentes parois sont classées de la façon suivante : (le classement a été tributaire du nombre de parois que l'on peut créer pour chaque famille)

<b>Aménagements &amp; Cloisons</b>	Cloisons (plâtre et parpaings)
<b>Couvertures</b>	Toitures
<b>Dalles &amp; Planchers</b>	Refends béton, aménagements (peinture...)
<b>Fondations &amp; Soubassements</b>	Fondations, dalle, planchers
<b>Huisseries &amp; Fermetures</b>	Vitrages
<b>Murs</b>	Parois extérieures

### 4.2.4. Simulation et scénarios – Comfie

Par soucis de simplicité concernant l'application des scénarios, le bâtiment n'a pas été détaillé pièce par pièce sous Comfie. On peut en effet supposer que les caractéristiques thermiques seront quasiment identiques au sein des trois zones suivantes : la remise, la base vie et la vigie. Seul un espace 'chambres' a été créé pour les variantes BBC/BEPAS/BEPOS étant la seule pièce de la base vie à bénéficier de la climatisation.

La remise ayant un comportement thermique particulier (peu chauffée en hiver, non climatisée en été) et étant soumise à des infiltrations importantes lors de l'ouverture des portes véhicule, augmenter l'épaisseur de l'isolant n'aurait pas beaucoup de sens et peu d'impact au niveau des consommations. Ainsi pour ne pas « noyer » les résultats de la base vie et de la vigie avec ceux de la remise, que ce soit pour les impacts environnementaux ou les consommations, il a été décidé qu'elle ne serait pas prise en compte dans les études qui suivent.

Comme cela a été précisé précédemment les valeurs des U ont été récupérées d'une étude en vue de la construction du bâtiment SSLIA d'Orly. Elles sont basées sur l'hypothèse qu'en niveau de performance BBC, BEPAS et BEPOS, la climatisation serait uniquement active dans les chambres et la vigie.

Les scénarios pour les différentes variantes sont les suivants :

		Consigne de température (°C)		Occup. (pers.)	Puissance dissipée (W/m <sup>2</sup> )		Ventilation (m <sup>3</sup> /h)		
		Été	Hiver		Eclairage	Autre	Air neuf	Infiltrations	Extraction
<b>Base Vie</b>	RT 2005	26	19	10	8	2	1125	634	330 (douches + vestiaires)
	BBC	26 (chambres seulement)			6	1	250	373	
	BEPAS							104	
	BEPOS								
<b>Vigie</b>	RT 2005	26	19	10	8	1000 W (ordin.)	16.5	46	0
	BBC				6		13.2	27	
	BEPAS							8	
	BEPOS								

Le bâtiment étant constamment occupé, ces valeurs sont considérées constantes 24h/24 tout au long de l'année. De la même façon que pour le bâtiment du CE, le système de ventilation est équipé d'un système double-flux ; les débits d'air neuf sont donc multipliés par 0,3 avant d'être saisis sous Comfie. Le fichier météo utilisé est également celui de la ville de Trappes.

## 4.3. Résultats

### 4.3.1. Equer VS Cocon

Concernant l'Energie Primaire Totale, les valeurs d'Equer ont été converties en kWh, étant fournies en MJ ; le résultat a été récupéré en additionnant les valeurs de Construction, Rénovation et Démolition.

	Bois		Béton	
	Equer	Cocon	Equer	Cocon
<b>Energie primaire totale (kWh)</b>	3 633 182	3 070 155	1 889 844	2 278 580
<b>Changement climatique (t CO2)</b>	214	63	465	435

*Comparaison des résultats entre Equer et Cocon (sur 30 ans)*

On observe que pour l'Energie Primaire Totale les valeurs sont du même ordre de grandeur. Les écarts s'expliquent par la différence de base de données ; Equer utilise des matériaux génériques alors que l'on a globalement des produits précis dans Cocon. De plus la base de données d'Equer date d'il y a presque 15 ans ; les procédés étaient alors peut-être plus énergivores. Enfin, le mix énergétique mais également les coefficients de calcul d'énergie primaire sont différents puisque les bases de données proviennent de pays différents.

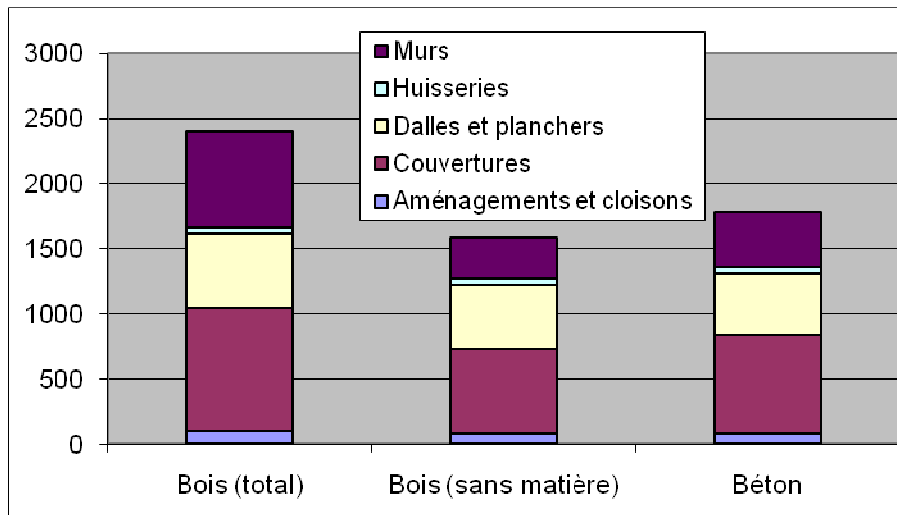
Pour le CO<sub>2</sub> un écart important apparaît pour la version Bois. On peut supposer que le stockage du carbone n'est pas pris en compte de la même façon dans chacune des bases de données, voire pas du tout pour la base de données d'Equer.

### 4.3.2. Part de l'énergie matière et stockage du CO<sub>2</sub>

Les FDES prenant en compte l'énergie matière il nous a paru judicieux de se défaire de cette part d'énergie lors de l'étude du bâtiment du CE afin de se rendre compte de l'énergie réellement utilisée lors du cycle de vie du produit. Pour ce faire les FDES de chaque produit bio-sourcé ont été récupérées afin d'en extraire le pourcentage d'énergie matière présente dans l'énergie primaire totale. Les produits ayant la part la plus importante d'énergie matière sont :

- le bois lourd (utilisé en bardage et en panneaux structurels) : 66%
- le bois lamellé-collé (poutres) : 50%
- le bois OSB (en parement plafond) : 57%

Certains produits tels que les parpaings ou les plaques de plâtres contiennent également de l'énergie matière, mais celle-ci représente à peine 5%, au grand maximum, de leur énergie primaire totale.



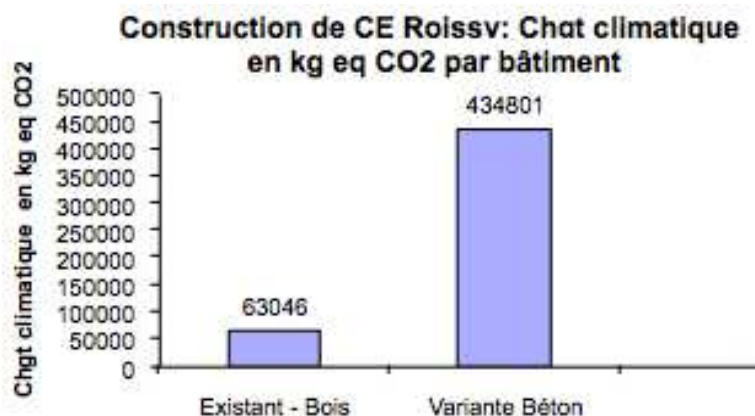
Comparaison de l'énergie primaire totale pour le bois, pour le béton, et pour le bois sans énergie matière (kWh/m<sup>2</sup>) (sur 30 ans)

Les barres « Bois (total) » et « Béton » représentent les résultats tels qu'obtenus avec Cocon pour nos deux variantes Bois et Béton du bâtiment du CE. La barre du milieu, « Bois (sans matière) » représente l'énergie primaire de la version Bois de laquelle on a déduit l'énergie matière présente dans les 3 matériaux cités précédemment.

On remarque que dans l'ensemble l'énergie matière représente un peu plus de 30 % de l'énergie primaire totale de l'ensemble du bâtiment, ce qui n'est pas négligeable. Ainsi l'énergie primaire totale de la version Bois, qui était bien supérieure à celle de la version Béton, est finalement du même ordre de grandeur voire légèrement plus faible.

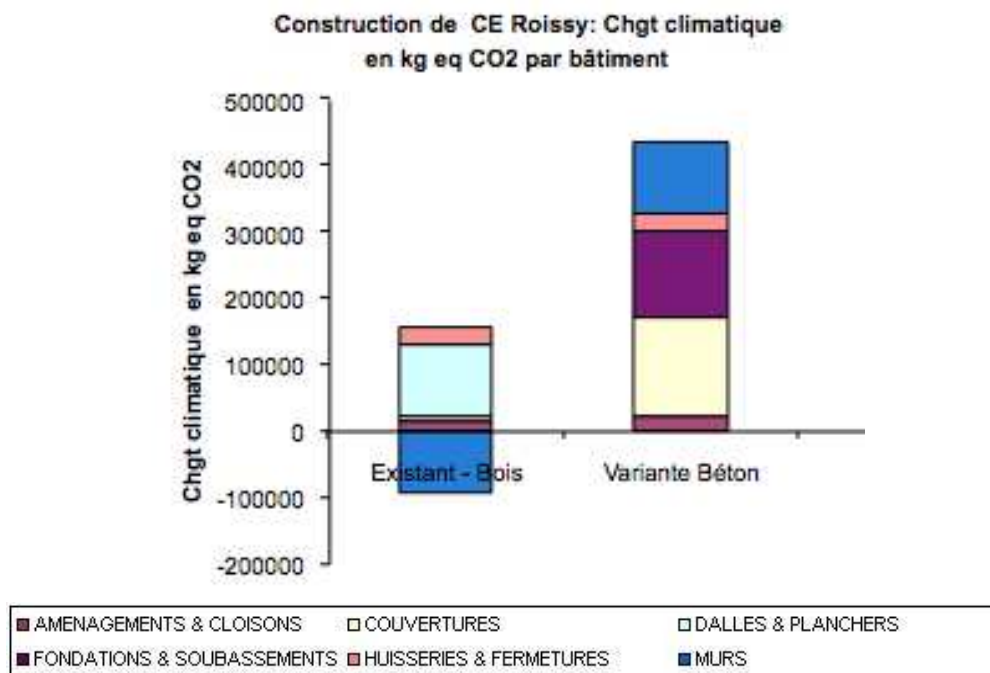
Dans la suite de l'étude on ne considèrera plus que l'énergie primaire totale sans l'énergie matière puisque nous sommes d'accord que sur le principe, prendre en compte l'énergie matière ne fait que défavoriser les matériaux qui en contiennent, alors qu'il s'agit au contraire d'un point positif : même si cette énergie est monopolisée lors de l'existence du bâtiment, elle sera toujours récupérable en fin de vie.

En ce qui concerne le stockage du CO<sub>2</sub>, on peut constater la différence de changement climatique pour les deux variantes sur le graphique suivant :



Emissions de CO<sub>2</sub> (kg) pour chacune des variantes (résultat Cocon)

La prise en compte du stockage du CO<sub>2</sub> dans le calcul des émissions de CO<sub>2</sub> dans les FDES ne fait aucun doute. On peut en effet le constater sur le graphique suivant, qui distingue les différentes familles de parois :



*Emissions de CO<sub>2</sub> (kg) par famille de paroi pour chacune des variantes (résultat Cocon)*

Les murs, qui contiennent la part la plus importante de matériaux en bois (panneaux structuraux et poutres en bois lamellé collé) présentent un changement climatique négatif. Les autres familles de paroi contiennent également une part de « CO<sub>2</sub> négatif » mais qui est masqué par la part plus importante de « CO<sub>2</sub> positif » due aux autres matériaux plus polluants (béton, métaux).

#### 4.3.3. Energie grise et Consommations d'occupation

Dans les graphiques qui suivent, tous les résultats concernant les matériaux (énergie primaire totale et émissions de CO<sub>2</sub>) du bâtiment sont issus de Cocon.

Afin de simplifier les dénominations et les explications, on appellera, dans toute la suite des études, « énergie grise » l'énergie primaire totale des matériaux utilisés. « Energie d'utilisation » désignera l'énergie primaire due à l'occupation du bâtiment (consommations électriques).

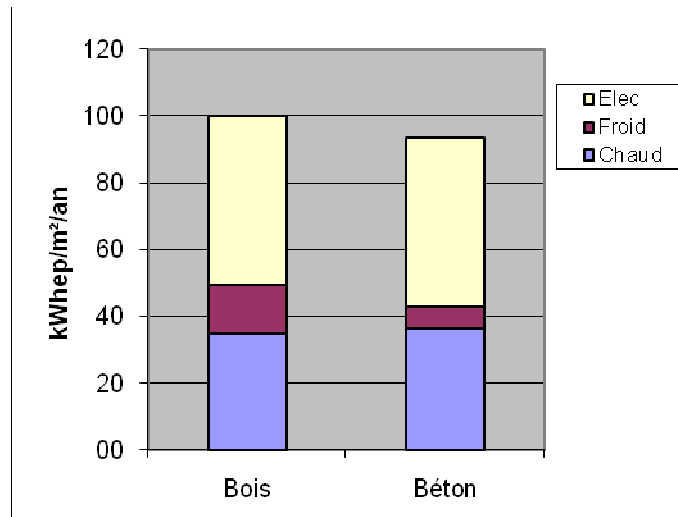
#### Bâtiment du CE

Bien que d'un point de vue résistance thermique les performances des deux versions sont les mêmes, il n'en reste pas moins que le bois et le béton n'ont pas les mêmes propriétés thermiques, notamment en terme d'inertie (capacité à stocker la chaleur et à la restituer plus tard, cf paragraphe 7.1.). Afin que l'analyse des impacts environnementaux de la construction du bâtiment soit pertinente, il est alors nécessaire de prendre également en compte l'énergie d'utilisation du bâtiment.

Du fait qu'il n'y ait pas de visibilité sur les calculs effectués par Equer concernant la phase d'Utilisation, mais aussi parce que des valeurs de la base de données Ecoinvent sont utilisés et que l'on ne peut pas tout spécifier (énergie de production de froid, équipement de production de chaud et de froid), l'énergie d'utilisation a été calculée « à la main » en créant un outil sous Excel, en partant des besoins en chauffage et en refroidissement obtenus à l'aide de Comfie. A cela ont été ajoutés l'éclairage, à partir des scénarios créés sous Comfie, et les auxiliaires (pompes, ventilateurs,...) en supposant une consommation de 0.45 W par m<sup>3</sup>.h d'insufflation et 0.3 pour l'extraction.

Les hypothèses de calcul sont précisées en Annexe.



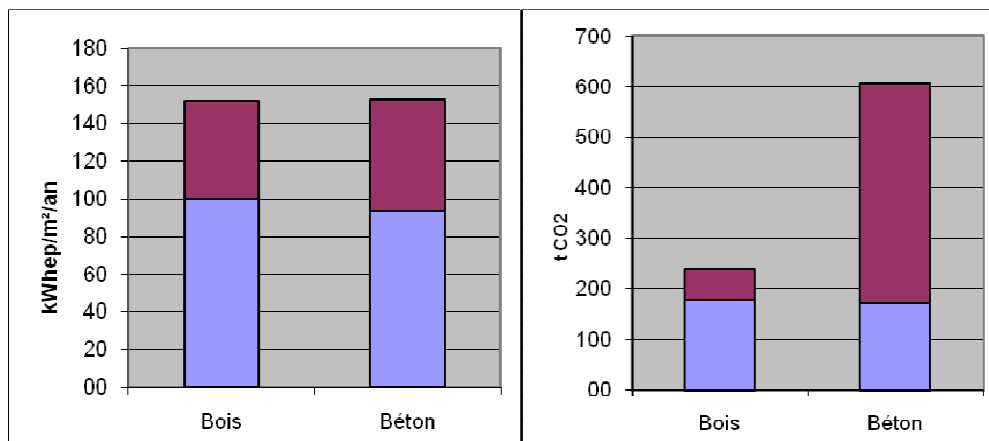


Energie primaire totale pour l'utilisation du bâtiment

On remarque qu'il y a effectivement des différences en besoins de chauffage, légèrement plus élevés pour le béton, et de climatisation, plus élevés pour le bois. Ces différences peuvent s'expliquer par l'inertie accrue du béton, qui conserverait plus de chaleur que le bois, et donc nécessiterait plus de chauffage en hiver, mais moins de rafraîchissement en été. Il est à noter que les occultations au niveau des vitrages n'ont pas été prises en compte dans les calculs ; on peut ainsi supposer que les différences en besoin de climatisation seraient alors moindres en réalité.

Cependant ces différences restent relativement faibles, et sur le bilan global d'énergie primaire totale (énergie grise + énergie d'utilisation) les versions Bois et Béton sont équivalentes.

Ce qui n'est pas le cas des émissions de CO<sub>2</sub>, comme on peut le voir sur la figure suivante.



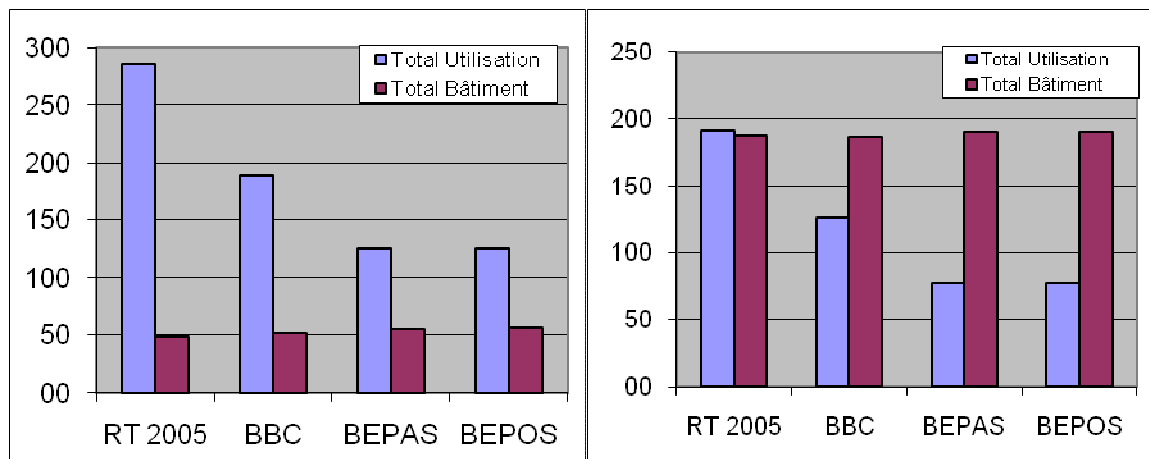
Energie primaire totale et émissions de CO<sub>2</sub> pour la construction du bâtiment (énergie grise), en rouge, et son utilisation, en bleu, pour chacune des variantes Bois et Béton

Les consommations énergétiques dues à l'utilisation du bâtiment étant quasiment les mêmes pour les deux versions, les émissions de CO<sub>2</sub> correspondent également. Ainsi la différence entre les émissions de CO<sub>2</sub> provient du bâtiment, et comme on a pu le voir précédemment cette différence est importante du fait du stockage du CO<sub>2</sub> dans les produits d'origine bois.

**Une construction en bois ne génère donc pas un besoin énergétique supérieur** ni pour sa construction ni pour son utilisation, malgré un comportement thermique légèrement différent, qu'un bâtiment classique en acier et en béton. **Cependant la différence de changement climatique est non négligeable**, puisque diminué de plus de la moitié pour une construction bois, comparativement à la version béton.

## Bâtiment du SSLIA

Après avoir calculé l'énergie consommée pour l'éclairage et les auxiliaires et l'énergie primaire qui en résulte (hypothèses en Annexe), ainsi que pour le chauffage et le rafraîchissement, on peut observer sur les figures suivantes l'énergie grise et l'énergie d'utilisation d'un bâtiment d'une part, et les émissions de CO<sub>2</sub> d'autre part, et ce pour chacune des variantes définies plus haut :



*Energie primaire totale (kWh/m<sup>2</sup>.an) et Changement climatique (kg eq CO<sub>2</sub>/an) pour une durée de vie de 30 ans*

La variante BEPOS n'aurait pas été nécessaire à l'étude mais sert de rappel : un bâtiment positif est un bâtiment passif dont les besoins énergétiques sont compensés par des énergies renouvelables produites sur place. Ainsi les énergies renouvelables ne trouvent leur utilité qu'une fois les besoins énergétiques réduits à leur minimum.

En ce qui concerne la part d'énergie grise par rapport à l'énergie d'utilisation, on passe de 16%, pour la variante de base RT 2005, à 44%, pour les variantes les plus performantes. De la même façon pour les émissions de CO<sub>2</sub> on passe ici du simple au double.

Ainsi on en conclut que **l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant et la modification des fenêtres n'ont qu'un impact minime**, qui se retrouve d'autant plus rapidement compensé par les améliorations en besoins énergétiques et en émissions de gaz à effet de serre.

On en conclut également que l'amélioration des performances énergétiques d'un bâtiment lors de son utilisation tend effectivement, comme on le supposait en introduction, à **rendre la part d'énergie grise beaucoup plus importante**. En atteignant de telles performances il devient alors évident qu'il faut commencer à **porter une attention particulière à l'énergie grise du bâtiment**, d'autant plus si ce dernier devient BEPOS, et qu'on peut alors supposer ses consommations nulles (i.e. contrebalancées par la production d'énergie in situ).

Rappelons que l'usage du bâtiment de SSLIA est particulier, puisque occupé 24h/24. Pour un bâtiment plus classique on peut imaginer que la part d'énergie grise est encore plus importante par rapport aux consommations, qui seraient moindre. On observe effectivement ce résultat pour le bâtiment de CE, en performance mieux que RT 2005, et où la part d'énergie grise représente environ 50%. Si l'on était en BBC ou BEPAS on aurait alors une part encore supérieure à 50%.

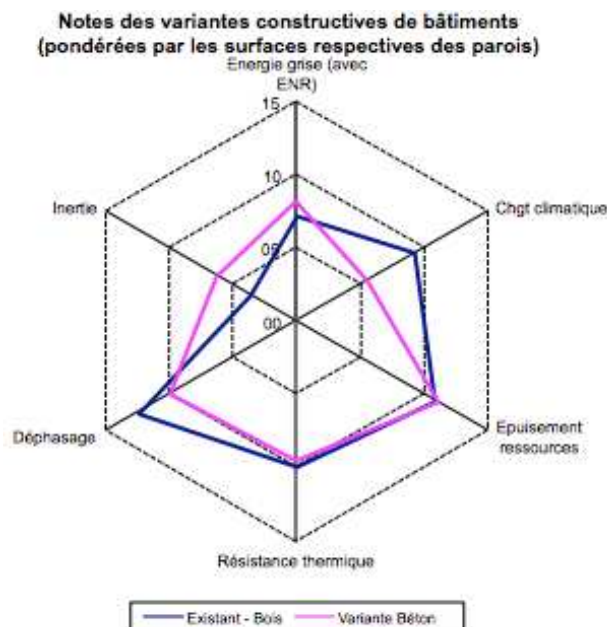
### 4.3.4. Notes Cocon

Les 6 notes évaluées par l'auteur de Cocon concernent les critères les plus déterminants selon lui. On y trouve 3 indicateurs d'impacts environnementaux : **Energie grise** (=Energie primaire totale), **Changement climatique**, **Epuisement des ressources** ; et 3 paramètres thermiques : **la résistance thermique, le déphasage et l'inertie** (cf paragraphe 7.1.).

Le graphique radar associé permet de comparer rapidement différentes variantes. Le calcul de ces notes est décrit en Annexe.

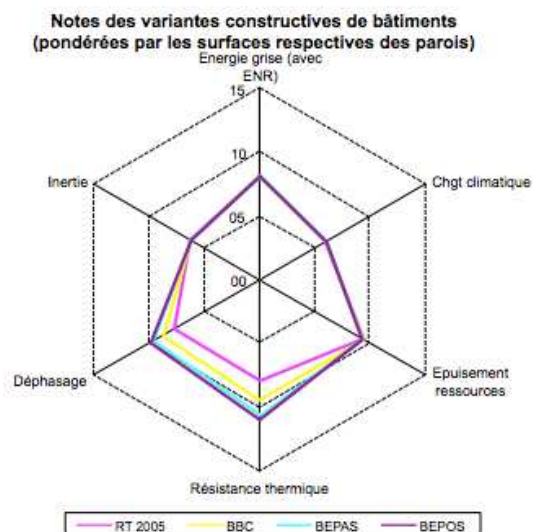
Les valeurs seuil n'étant en pratique pas atteignables à l'échelle du bâtiment pour certaines notes (0 pour l'énergie grise, -150 pour le changement climatique), le but de ces notes n'est pas d'essayer d'obtenir 20/20, mais bien de comparer les différentes variantes de bâtiments ou de parois, selon les critères propres à chaque projet (on ne veut pas systématiquement une bonne inertie, par exemple). Pour ce qui est de la résistance thermique, dont la note est basée sur la performance que l'on souhaiterait atteindre, il est par contre nécessaire d'obtenir au moins 10/20.

Pour le bâtiment du CE on obtient le graphique suivant :



On retrouve bien la tendance observée pour l'énergie grise (énergie matière comprise), plus élevée pour le Bois, ainsi que pour le changement climatique, plus élevé pour le Béton. On observe également les résultats prévisibles concernant l'inertie, qui est plus élevée pour la variante Béton, et le déphasage, plus important pour la variante Bois. La résistance thermique est identique puisqu'il s'agit du principe de l'étude.

Pour le bâtiment du SSLIA on obtient le graphique suivant :



Pour le cas du SSLIA on retrouve bien les variations très faibles de l'énergie grise et du changement climatique en ce qui concerne les indicateurs d'impacts environnementaux. Pour les indicateurs thermiques, on observe effectivement qu'augmenter l'épaisseur de l'isolant ne change rien à l'inertie du bâtiment, mais va cependant jouer sur le déphasage, et bien évidemment sa résistance thermique.

### 4.3.5. Poids relatif

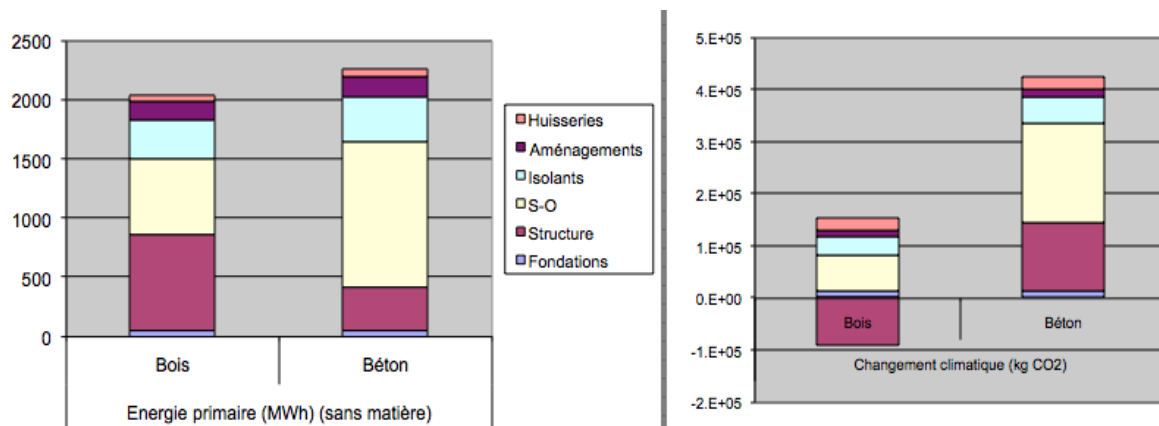
#### Différentes classifications

Comme on a déjà pu le voir dans les résultats précédents, Cocon permet de comparer les parois d'un bâtiment par famille de parois, comme par exemple les dalles, ou les couvertures. Cependant, il est également intéressant de se demander quelle est la part des différents lots sur la totalité de l'ouvrage.

Les lots ont été différenciés comme suit :

<b>Huisseries</b>	Fenêtres (extérieures et intérieures)
<b>Aménagements</b>	PVC sol, carrelage, peinture, faux-plafond
<b>Isolants</b>	isolants thermiques
<b>Second-œuvre</b>	isolants acoustiques, cloisons (parpaing, plâtre), étanchéité, bardage
<b>Structure</b>	dalles, parois structurelles, poteaux, poutrelles
<b>Fondations</b>	Fondations

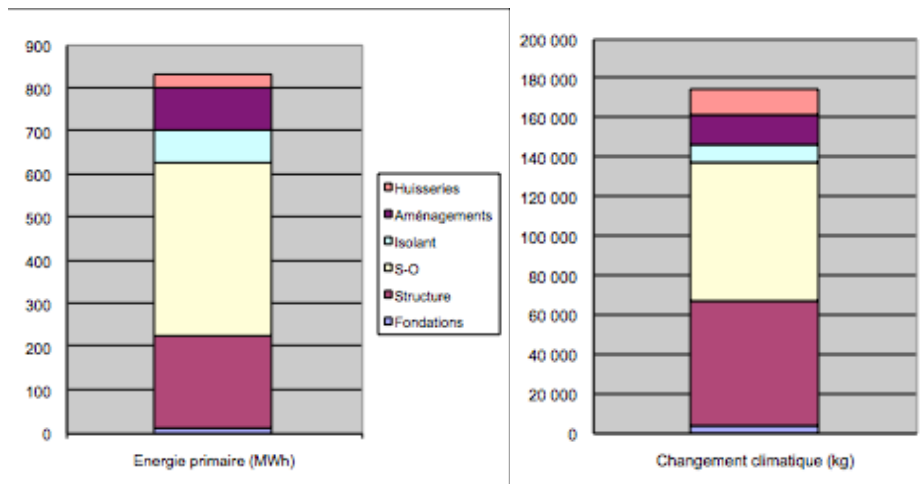
Sur le bâtiment du CE pour les deux versions et pour le bâtiment du SSLIA pour la base RT 2005, on obtient les résultats suivants :



Poids des différents lots pour le bâtiment du CE : Energie grise (sans matière pour le bois) en MWh et Changement climatique en tonnes CO<sub>2</sub>

On constate que la principale différence pour l'énergie grise se trouve au niveau de la structure, plus importante pour la version Bois, et du second-œuvre, plus important pour la version Béton. Ceci s'explique par le fait que les parois extérieures de la version Bois sont structurelles, alors que dans la version Béton les parois extérieures font parties du second-œuvre (excepté les poutrelles et les poteaux). Ainsi dans ce dernier cas on trouve le bardage en aluminium et le plateau acier ce qui peut expliquer la valeur d'énergie grise importante, de même que pour le changement climatique. La structure de la version Bois contient les poutres en bois lamellé-collé qui sont également énergivores.

En ce qui concerne le vitrage, il ne représente que 3% de l'énergie grise totale (version Bois). Même si celui-ci est très présent, 194 m<sup>2</sup> au total, soit 30% des les parois extérieures, il ne représente qu'environ 7% des principales parois (dalle, planchers, murs extérieurs, couverture) du bâtiment.

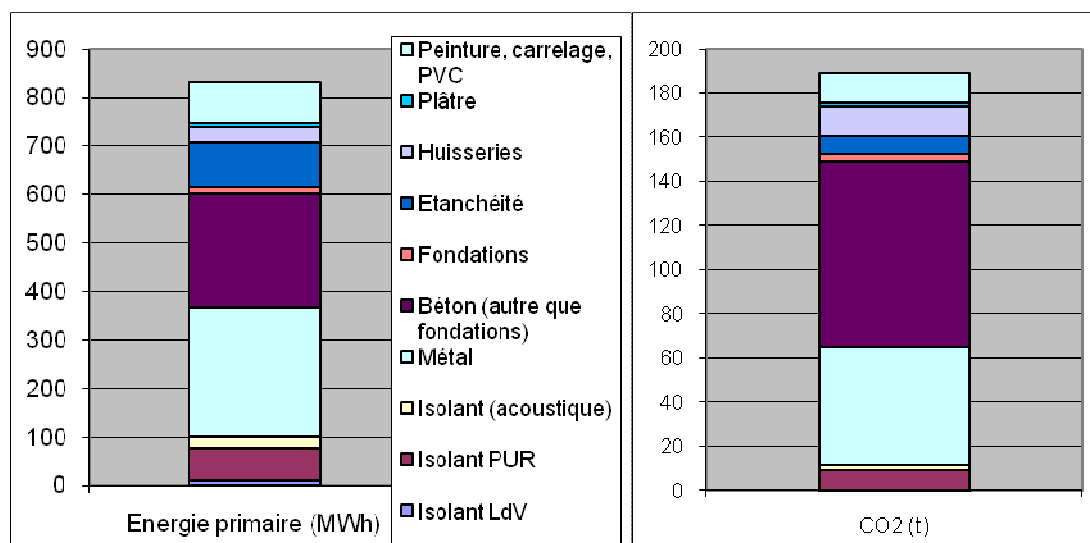


Poids des différents lots pour le bâtiment du SSLIA : Énergie grise en MWh et Changement climatique en tonnes CO<sub>2</sub>

Pour le bâtiment du SSLIA la part la plus importante revient également au second-œuvre, le type de construction étant semblable à la version Béton du bâtiment du CE. On en vient alors aux mêmes conclusions concernant l'utilisation d'aluminium et d'acier.

Cependant la classification des matériaux en lots implique le mélange de différents types de matériaux. Or il est également bien connu que des matériaux tels que le béton et autres ciments ou le polyuréthane sont très énergivores et émetteurs de CO<sub>2</sub>.

Ainsi les graphiques suivants présentent une classification plus précise, dépendant dans l'ensemble de la matière première du produit :

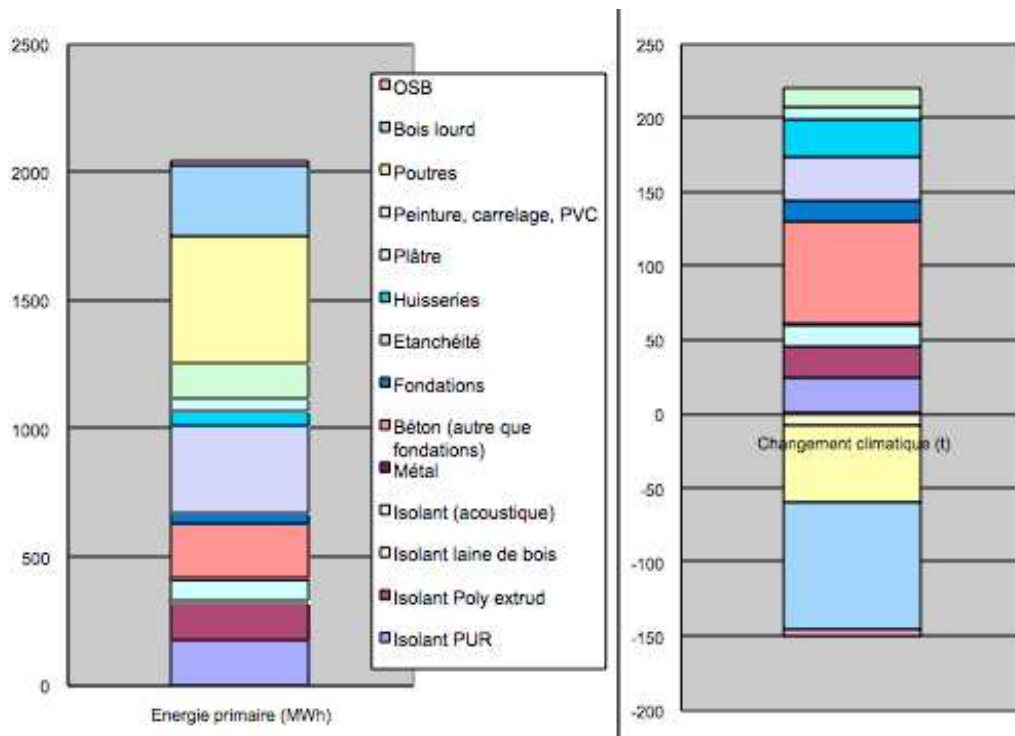


Poids des différents matériaux pour le bâtiment du SSLIA : Énergie grise en MWh et Changement climatique en tonnes CO<sub>2</sub>

Pour le bâtiment du SSLIA, on constate que le métal représente effectivement une grande part (31,9%) de l'énergie grise totale mais qu'il n'est finalement pas le seul représentant important du second œuvre, puisque l'on peut voir par exemple que l'étanchéité n'est pas à négliger non plus, puisqu'elle représente 11,2%, soit autant que l'isolation, alors qu'elle est uniquement présente en toiture.

Par ailleurs, en ce qui concerne l'isolation, elle est constituée de polyuréthane et de laine de verre. On remarque que le polyuréthane a le plus d'impact, représentant 87,8% de l'énergie grise de l'ensemble des isolants.

Pour ce qui est du béton (parpaings inclus), on se rend compte que sa part d'énergie grise est finalement aussi importante (28,5%) que la part des métaux (31,9%). Cependant cela confirme l'impact important de ces derniers, puisque sur l'ensemble de l'ouvrage leur quantité est moindre que celle du béton (2 m<sup>3</sup> contre 309 m<sup>3</sup>).



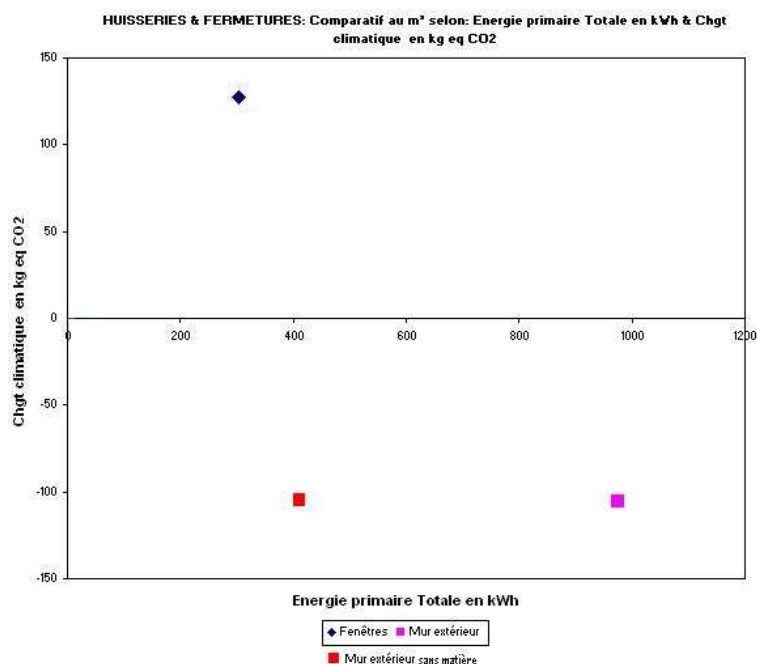
Poids des différents matériaux pour le bâtiment du CE : Energie grise en MWh et Changement climatique en tonnes CO<sub>2</sub>

Pour le bâtiment du CE, on constate effectivement que les poutres en bois lamellé-collé sont très énergivores (24%), alors que l'énergie matière n'est pas prise en compte. Suivent ensuite l'étanchéité (17%) et le bois lourd (13%).

Bien que les produits d'origine bois ne soient pas moins énergivores que des métaux ou du béton, ils permettent cependant de réduire les émissions de gaz de 62%.

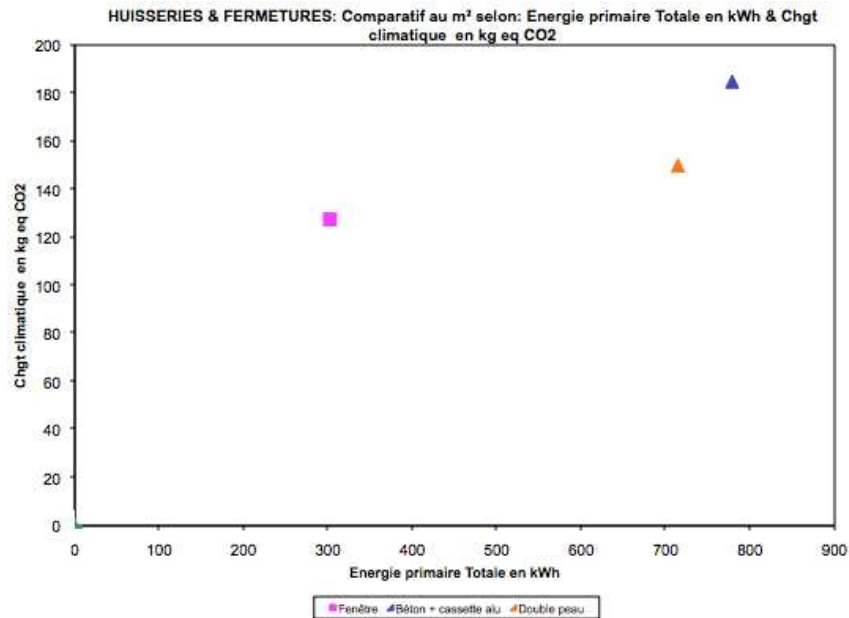
## Vitrages

On a vu dans le paragraphe précédent que les vitrages, bien que représentant 194 m<sup>2</sup> de l'ensemble de l'ouvrage du CE n'ont pas la part d'impact la plus importante. Si l'on compare 1 m<sup>2</sup> de vitrage avec 1 m<sup>2</sup> de paroi extérieure opaque, on obtient le graphique suivant :



Obtenu à partir de Cocon, un point a été ajouté (en rouge) afin de ne pas prendre en compte la part d'énergie matière de la paroi opaque. On constate en effet que l'énergie grise d'1 m<sup>2</sup> de vitrage n'est pas plus importante qu'1 m<sup>2</sup> de paroi opaque. Ajouté à cela toutes les autres parois du bâtiment on comprend mieux pourquoi le vitrage n'a pas un impact très important au niveau énergétique. Il est cependant plus prépondérant en ce qui concerne le changement climatique puisque le vitrage « compense » le stockage du CO<sub>2</sub> induit par la paroi opaque.

En ce qui concerne le bâtiment du SSLIA, l'effet est inverse : les émissions de gaz à effet de serre sont du même ordre de grandeur, mais l'énergie grise du vitrage est deux fois moindre que les différents types de paroi opaque.



## 5. Etude d'un projet en cours : rénovation de l'aérogare 2B

### 5.1. Présentation

La rénovation de l'aérogare 2B est assez conséquente puisqu'elle ne conserve quasiment que la structure, à savoir les dalles, les coques, et les parois Est et Ouest. Tout l'espace intérieur est revu, et les façades côté piste et côté ville avancées.

### 5.2. But de l'étude

Le projet étant en cours, l'intérêt de son étude avec Cocon est de comparer différentes solutions constructives et notamment différents matériaux. Ces considérations concernent principalement le matériau de constitution des sheds, les sols, les faux plafonds des sheds et des coques et les parois de la zone PIF.

Dans un premier temps le but de l'étude est donc de voir la part que peut représenter les différents types de parois sur la globalité de l'énergie grise nécessaire à la rénovation, pour conclure sur l'importance à apporter aux différents matériaux. On va cependant très vite se rendre compte que cet exercice ne sera pas aisé du fait de l'utilisation de matériaux peu courants.

Dans un deuxième temps, sachant que les parois vitrées sont importantes dans cette rénovation, il serait intéressant de savoir si l'opacification d'une partie de ces parois ne serait pas plus intéressant d'un point de vue environnemental.

### 5.3. Utilisation de matériaux spécifiques

Certains des matériaux qui seraient susceptibles d'être utilisés pour la rénovation ne font pas l'objet d'une FDES. Les matériaux concernés sont les suivants :

- danpalon : panneau alvéolé en polycarbonate
- ductal : béton fibré à ultra-hautes performances (BFUHP)(mélange d'un liant de type béton et de fibres métalliques)
- Hi-MACS : matériau constitué de bauxite (70%) et de résine acrylique (25%)

Leur utilisation serait respectivement : sous-face des coques, matériau de constitution des sheds, parois de la zone PIF.

La question est de savoir si remplacer ces matériaux par des matériaux s'y approchant constituerait une erreur importante ou non.

Pour ce faire différentes variantes sont étudiées pour chaque matériau, afin de voir si la différence de résultats est significative ou non :

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Danpalon	Revêtement sol PVC	Plafond tendu réalisé à partir de feuilles de PVC	Surface doublée de la variante 1
Ductal	Elements architecturaux en béton	Mur en béton armé	Surface doublée de la variante 1
Hi -MACS	Plaque silico-calcaire Hydropanel + profilé PVC de décoration	Pierre ferme et demi-ferme + profilé PVC de décoration	Surface doublée de la variante 1

L'intérêt de doubler la surface du matériau est de considérer que l'énergie grise du matériau est double pour la surface de base.

#### 5.3.1. Inventaire des surfaces et des matériaux

Le tableau suivant comporte les différentes parois qui seront construites dans le cadre de la rénovation, avec leur surface et matériau associés :



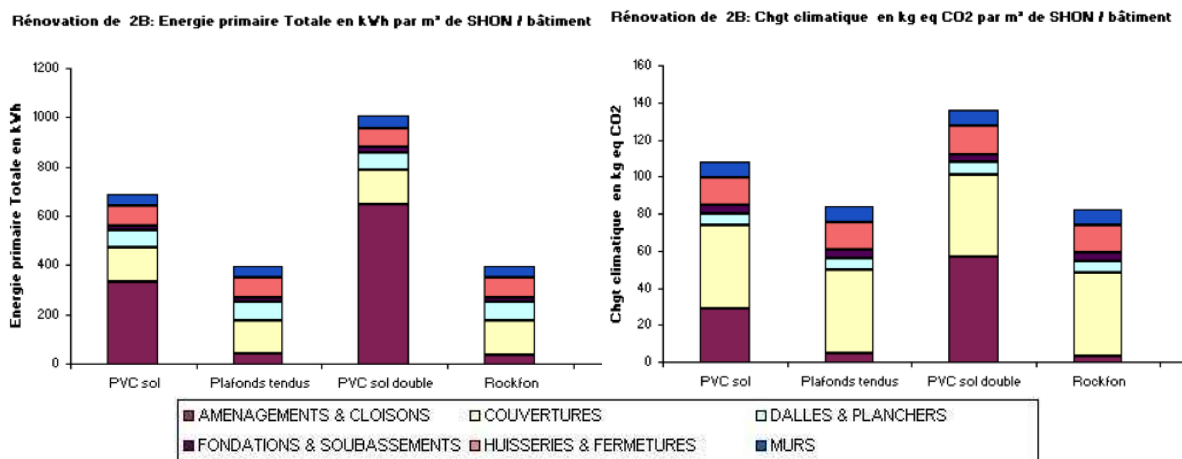
PAROIS	SURFACES (m²)	MATERIAU
vitrage inter-coques	1 840	mur rideau
vitrage sheds côté ville	994	
vitrage sheds côté piste	3 197	
vitrage coques-sheds	1 754	
sheds côté ville	2 277	ductal
sheds côté piste	7 210	/
faux plfd sheds (ville)	2 277	rockfon
faux plfd sheds (piste)	7 210	
sous-face des coques	11 862	danpalon
pignons (est + ouest)	180	mur rideau
côté ville	2 290	mur rideau
côté piste	2 190	mur rideau
hall public (N5.20)	3 010	marbre
hall public (N0.00)	2 163	
embarquement	8 628	50% marbre, 50% moquette
PIF	2 164	marbre
DPAF (N5.20)	293	marbre
sanitaires	818	carrelage
coursive débarquement (N5.20)	912	moquette
coursive correspondance (N2.60)	1 119	moquette
coursive débarquement (N0.00)	1 721	marbre
livraison bagages	3 056	marbre
DPAF (N0.00)	505	marbre
vitrage hall public	372	mur rideau
PIF	307	Structure acier + Hi-MACS + LdR
Séparation débarquement/embarquement	1010	simple vitrage

Le tableau suivant décrit la répartition des différentes parois selon les classes de paroi définies par Cocon :

<b>Aménagements et cloisons</b>	Faux plafond des sheds + sous-face des coques
<b>Couvertures</b>	Sheds
<b>Dalles et planchers</b>	Tous les sols
<b>Fondations et soubassements</b>	Support des sheds + poutres acier
<b>Huisseries et Fermetures</b>	Vitrages en couverture
<b>Murs</b>	Façades vitrés côté ville et côté piste + pignons est et ouest + cloisons PIF + vitrage hall public

### 5.3.2. Cas 1 : Danpalon

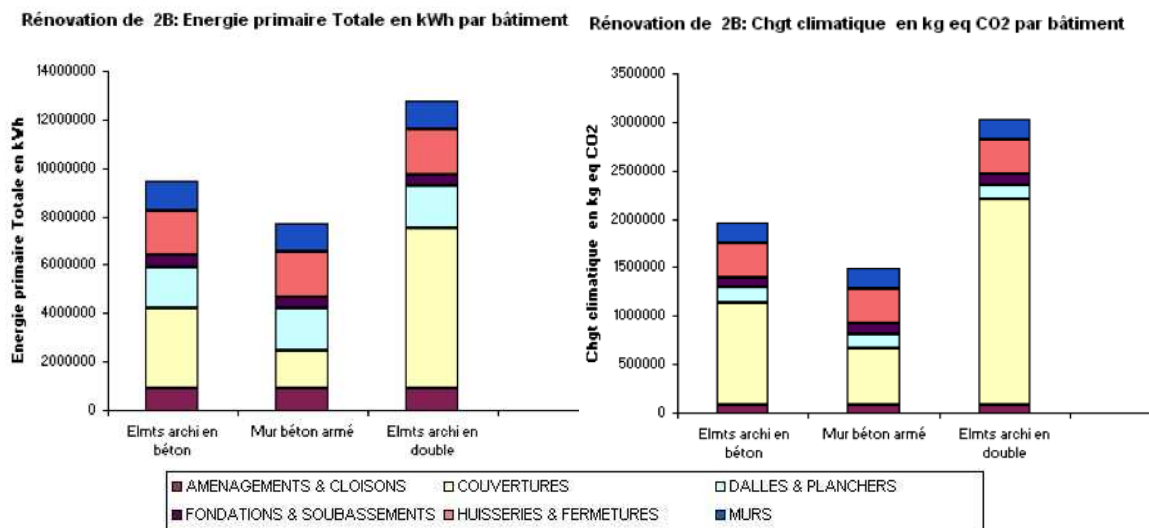
Les résultats pour l'énergie primaire totale et les émissions de CO2 du danpalon, installé en sous-face des coques, sont les suivants :



Clairement les différentes variantes de remplacement du matériau danpalon obtiennent des résultats différents (du simple au double dans certains cas), la surface des coques étant non négligeable. Le Rockfon (Laine de verre + peinture) représente une variante envisageable du Danpalon ; il n'est donc pas réaliste de comparer les 2 variantes sans connaissance précise de l'impact du Danpalon.

### 5.3.3. Cas 2 : Ductal

Les résultats pour l'énergie primaire totale et les émissions de CO2 du Ductal, matériau de constitution des sheds, sont les suivants :

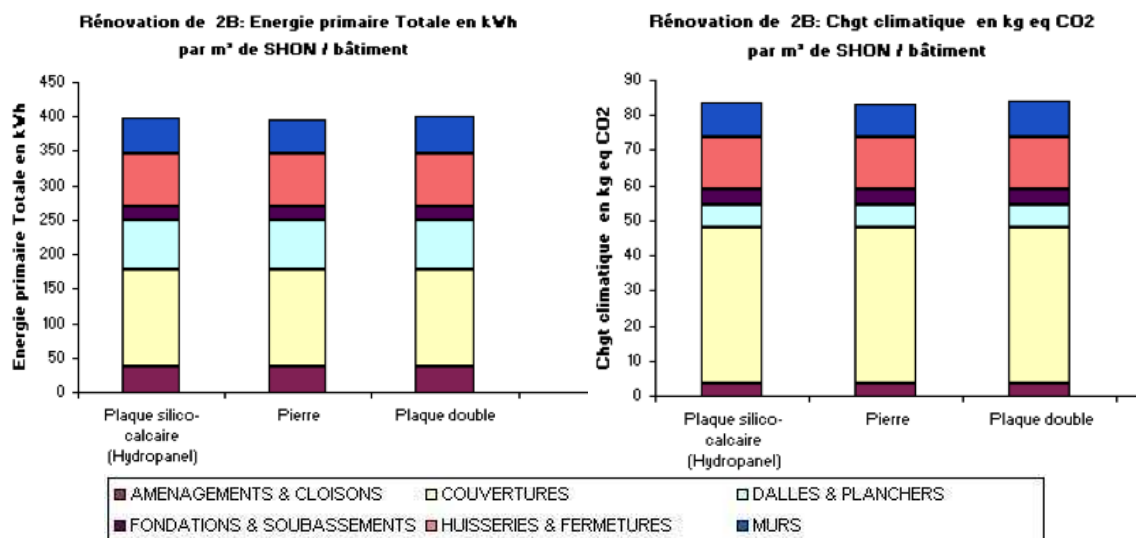


A nouveau la différence d'une variante à l'autre est non négligeable.

Cette [source](http://www.ductal-lafarge.fr) ([www.ductal-lafarge.fr](http://www.ductal-lafarge.fr)) donne une estimation de l'énergie grise du ductal, qui s'avère proche du produit 'Elements architecturaux en béton'. Cependant les émissions de CO<sub>2</sub> ne correspondent pas, et à cela s'ajoute l'approximation du calcul, qui consiste à additionner l'énergie grise du béton et des fibres métalliques (ce qui n'intègre donc pas les procédés de fabrication), et également le fait que l'énergie primaire soit calculée à partir d'un coefficient 0,79 pour l'électricité (USA, contre 2,58 en France).

### 5.3.4. Cas 3 : Hi-MACS

Les résultats pour l'énergie primaire totale et les émissions de CO2 du Hi-MACS, matériau de constitution des cloisons de la zone PIF, sont les suivants :



La surface des cloisons des PIF étant faible comparée à la surface totale des parois construites, leur impact n'est pas significatif.

Ce matériau est susceptible d'être également utilisé pour certains commerces ; en supposant leurs surfaces du même ordre que pour la zone PIF on peut envisager de réaliser des simulations avec un matériau de remplacement pour le Hi-MACS.

### 5.3.5. Conclusion

Du fait de leurs particularités architecturales, les aérogares ont tendance à renfermer des matériaux non conventionnels. Parce que la base de données de Cocon regroupe majoritairement des produits communs, et que de nombreux produits ne font pas encore l'objet de FDES (donc d'autant plus les produits moins répandus) l'évaluation d'un projet du type 2B est plus délicate, comparée à des bâtiments de bureau par exemple.

On en conclut que le choix des matériaux peut avoir un impact non négligeable, et peut passer de 20% à 50% par rapport à l'énergie grise totale de l'ouvrage. Bien que sur ce projet il ne soit pas possible de décider si le ductal ou le danpalon sont un bon choix ou non, il sera intéressant de faire ce genre d'étude sur tous les futurs projets où l'on disposera des informations nécessaires.

## 5.4. Etude sur le pourcentage de surface vitrée

Une des questions soulevées dans le cas de la rénovation de l'aérogare 2B est l'impact du vitrage, puisqu'il représente une part importante des surfaces construites : parois verticales côté ville, parois verticales côté piste et couverture entre les sheds et les coques, soit 12445 m² sur 62 453 m² au total.

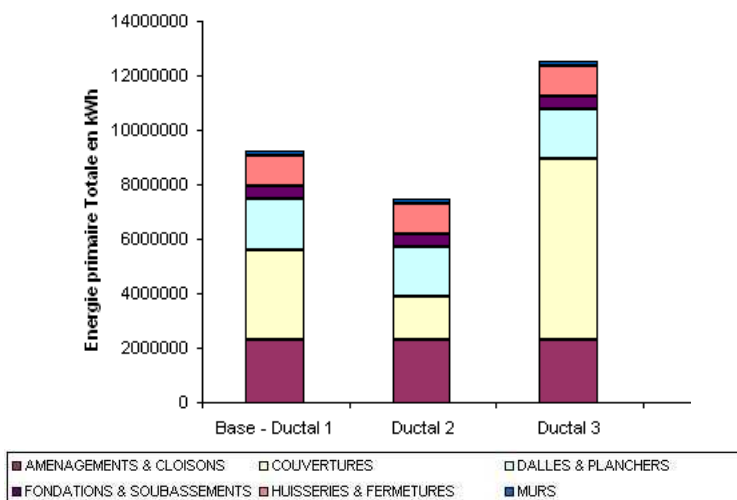
La durée de vie estimée du bâtiment est de 30ans.

La version de base de cette étude est composée des matériaux suivants :

<b>Sous-face des coques et des sheds</b>	Rockfon
<b>Sheds</b>	Elements architecturaux en béton
<b>Parois PIF</b>	Bois
<b>Vitrages</b>	Mur-rideau

Comme on a vu précédemment que l'on ne connaissait pas clairement l'impact du ductal, deux autres variantes ont été utilisés en le remplaçant à nouveau soit par du béton armé, soit par un impact 2 fois plus important que celui d'"Eléments architecturaux en béton".

Construction de 2B: Energie primaire Totale en kWh par bâtiment

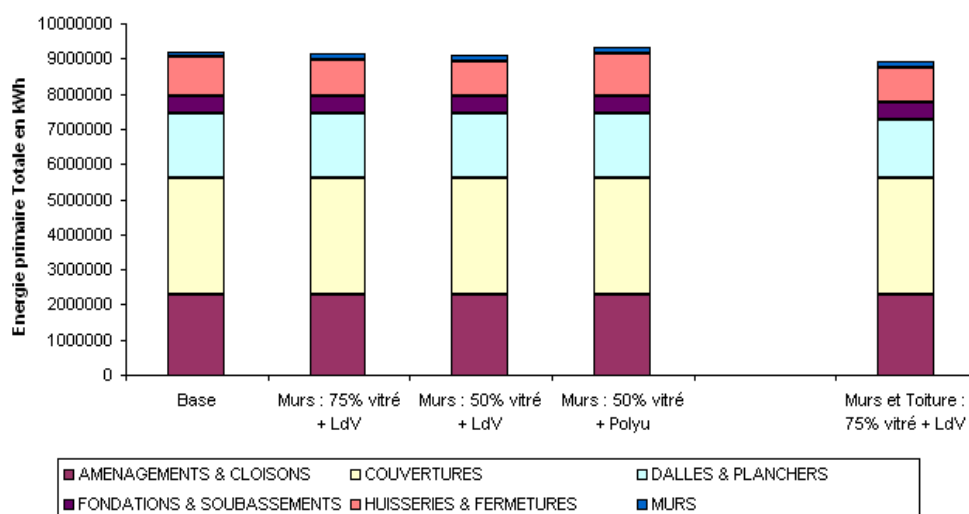


Famille de parois	Contenu
<b>Aménagements &amp; Cloisons</b>	Rockfon, Marbre, Moquette, Carrelage
<b>Couvertures</b>	Sheds
<b>Dalles &amp; Planchers</b>	<b>Vitrage horizontal et paroi opaque associée</b>
<b>Fondations &amp; Soubassements</b>	Poutrelles acier
<b>Huisseries &amp; Fermetures</b>	<b>Vitrage verticale et paroi opaque associée</b>
<b>Murs</b>	Vitrage intérieur, paroi PIF

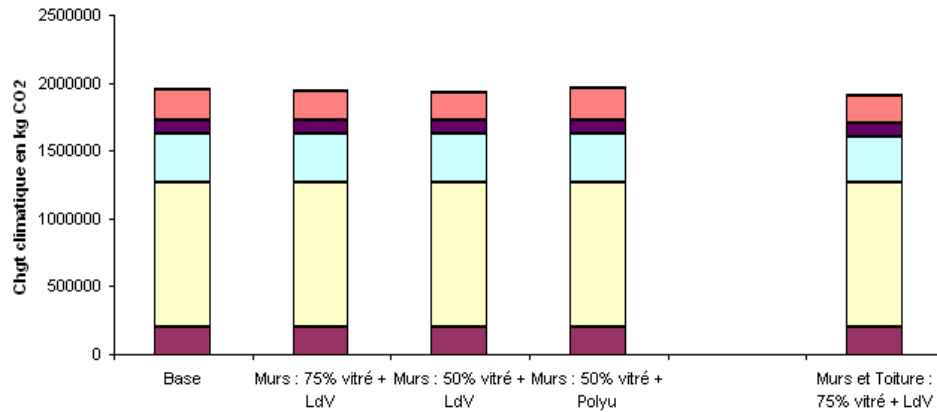
La part de l'impact du vitrage passe alors de 32% pour la version de base, à 40% pour la version la moins impactante (Béton armé) puis à 25% pour la version la plus impactante. Dans tous les cas la part de l'énergie grise due aux vitrages n'est pas négligeable.

La paroi opaque qui permettrait de diminuer les surfaces vitrées serait constituée de panneaux sandwich. Deux variantes ont été étudiées, l'une avec de la laine de verre, l'autre avec du polyuréthane (on utilise ici la version de base pour le ductal, à savoir Éléments architecturaux en béton).

Construction de 2B: Energie primaire Totale en kWh par bâtiment



### Construction de 2B: Chgt climatique en kg CO2 par bâtiment



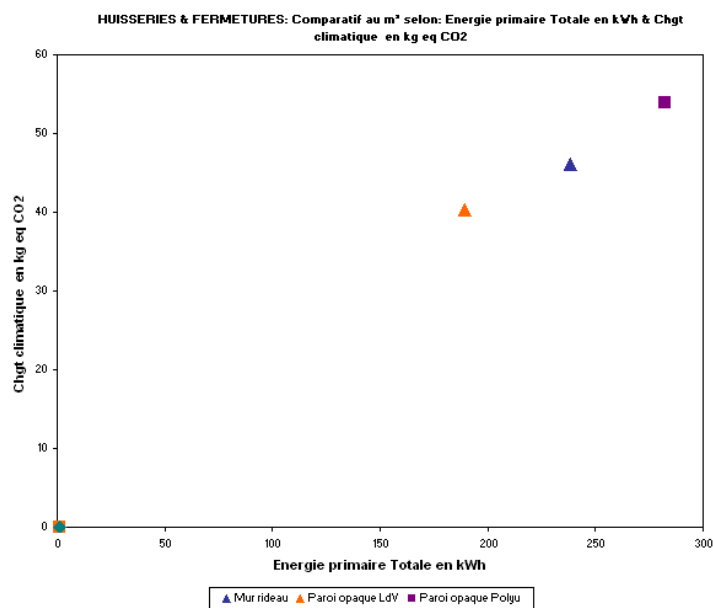
Pour cette version de ductal, on a vu que la totalité des surfaces vitrées représente 32% de l'énergie grise nécessaire à la rénovation.

Si l'on passe à 75% de surface vitrée pour les parois verticales, avec une paroi opaque à base de laine de verre (1<sup>er</sup> cas), l'énergie grise de ces dernières diminue de 3%, et l'énergie grise totale de la rénovation de 1%. Avec 50% de surface vitrée (2<sup>e</sup> cas) on obtient des diminutions de 4 et 1.5% respectivement. Avec du polyuréthane (3<sup>e</sup> cas), l'énergie grise totale augmente de 1%.

En ce qui concerne le changement climatique on peut voir que la tendance serait la même.

Si l'on compare l'énergie grise et le changement climatique d'1 m<sup>2</sup> de paroi, comme on peut le voir sur le graphique ci-dessous, on constate que les trois parois (vitré, opaque avec laine de verre, opaque avec polyuréthane) sont finalement très proche et ont quasiment le même impact.

Ainsi, même en choisissant le cas le moins impactant, avec la laine de verre, et en opacifiant 25% des vitrages en façade verticale et horizontale, on diminue l'énergie grise d'à peine 4%.



Comparaison d'1m<sup>2</sup> de paroi opaque (laine de verre ou polyuréthane) et d'1m<sup>2</sup> de vitrage

On en conclut que l'énergie grise et le changement climatique ne sont pas un critère important dans le choix de la répartition paroi opaque/paroi vitrée. Si l'on voulait significativement réduire ces paramètres, il faudrait dans un premier temps envisager une paroi opaque beaucoup moins impactante et dans un deuxième temps opacifier de plus de 25% toutes les surfaces vitrées au minimum, ce qui peut alors avoir des répercussions sur les demandes en éclairage.

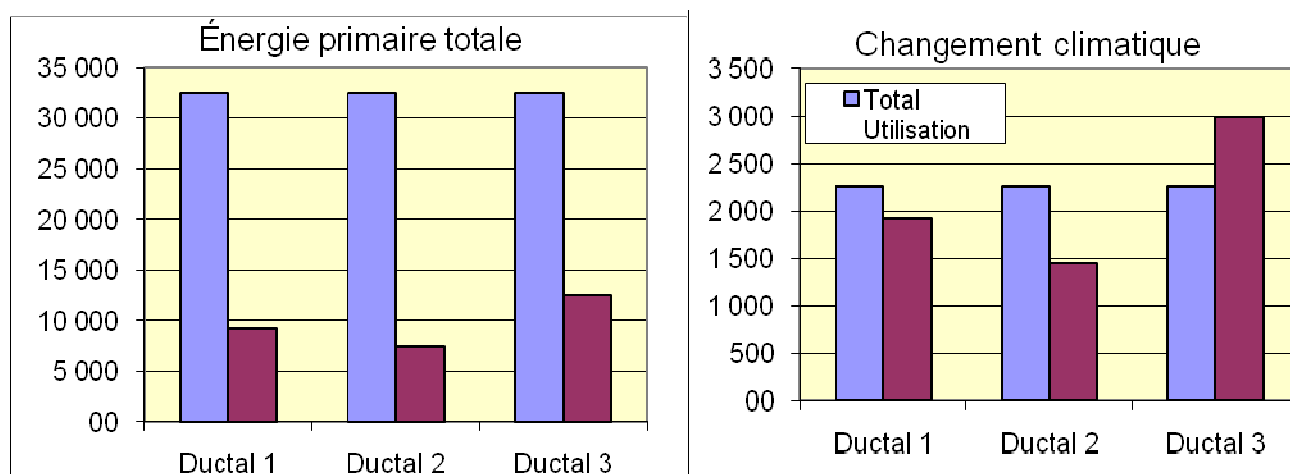
## 5.5. Comparaison avec les consommations

Les estimations des besoins sur 30 ans une fois les travaux finis sont les suivantes :

- chaleur : 5600 MWh
- froid : 4650 MWh
- électricité : 8570 MWh

Pour la production de froid on suppose un COP de 3.2 et pour la production de chaud un rendement de 90% (pertes sur le réseau comprises).

On obtient alors les graphiques suivants :



Énergie Primaire Totale en kWh/m<sup>2</sup>/an et Changement climatique en t eq CO<sub>2</sub> pour les matériaux (en rouge) et l'utilisation du bâtiment (en bleu)

Dans le cas où le Ductal implique le plus d'énergie grise, celle-ci représente 39% des consommations sur les 30 ans. Comme on l'a vu dans les études réalisées sur le SSLIA et le CE de Roissy, ce résultat s'approche de ce qu'on peut obtenir en performance BBC voire BEPAS, et n'est pas négligeable.

Il faut alors garder à l'esprit qu'il ne s'agit pas d'une reconstruction complète, seule une partie du bâtiment est rénovée ; dans le cas d'une reconstruction complète, on pourrait imaginer que l'énergie grise serait au moins équivalente à l'énergie des consommations, puisque la structure conservée représente une quantité très importante de béton, matériau reconnu pour être énergivore et émetteur de CO<sub>2</sub>

## 6. Conclusions et observations

---

### 6.1. Conclusion sur les différents logiciels

#### 6.1.1. Utilisation – ergonomie, souplesse, résultats

D'un point de vue pratique, Equer est très vite lésé du fait qu'il nécessite l'utilisation systématique de Comfie, qui est lourde et demande à chaque fois un nouveau calcul. Certes cela se fait facilement si le projet a nécessité une simulation thermique dynamique au préalable, cependant cette dernière ne prend pas en compte toutes les parties du bâtiment comme par exemple les acrotères, qui n'ont pas d'impact au niveau thermique. Il faudra alors songer à ajouter artificiellement ce type de parois.

Quoiqu'il en soit, concernant les besoins d'INA, Equer reste également limité au niveau de la présentation des résultats, qui permet peu de flexibilité.

C'est d'ailleurs à ce niveau-là que Cocon gagne des points, puisqu'en plus de présenter une multitude de graphiques différents (par impact, par nombre de critères, par parois,...) il est également très facile de récupérer les données qui nous intéressent, que ce soit à l'échelle du bâtiment, de la famille de paroi ou de la paroi, et de présenter ainsi nos propres graphiques selon le résultat à mettre en valeur.

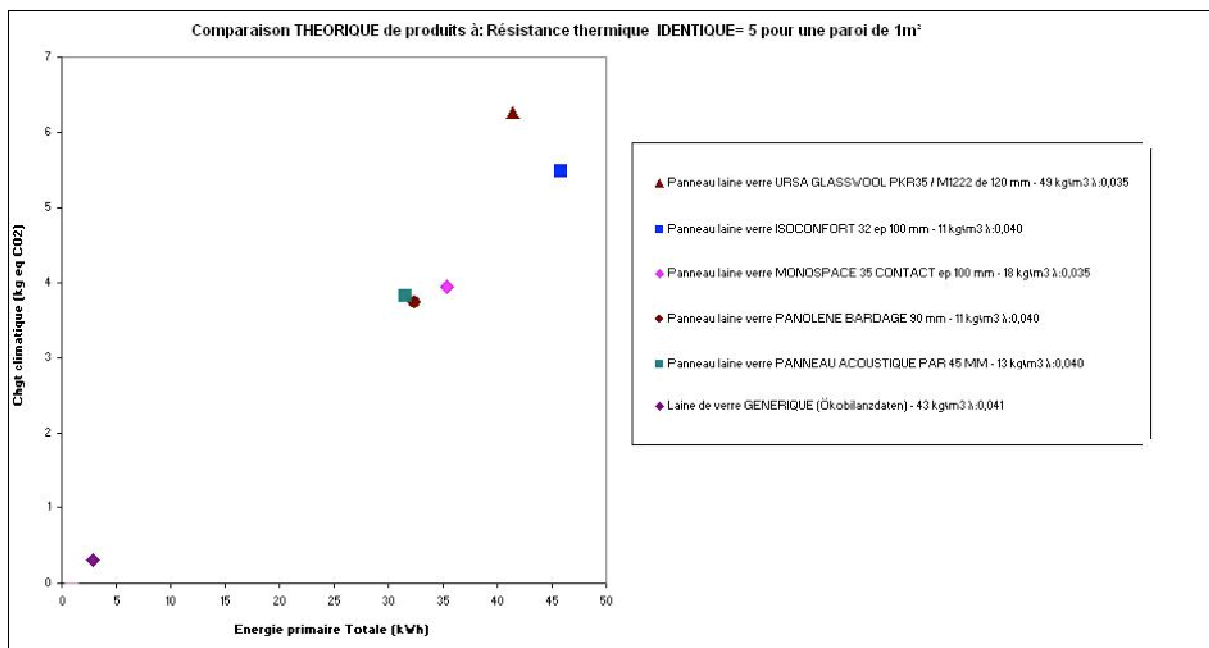
Bien que son interface sous Excel ne rende pas son utilisation directement intuitive, cela permet d'obtenir des résultats de façon dynamique, et il n'est pas nécessaire de lancer un calcul à chaque modification.

#### 6.1.2. Bases de données

En ce qui concerne les bases de données utilisées par chaque programme, Cocon semble plus adapté puisque principalement basé sur les FDES. Ces dernières sont françaises et vont donc englober la majorité des produits utilisés, et de plus elles sont accessibles, ce qui permet de récupérer des données directement à la source, mais aussi de vérifier les hypothèses utilisées. Enfin, il s'agit d'une base de données qui va évoluer, les fabricants ayant de plus en plus tendance à en produire.

A l'opposé, la base de données d'Equer n'est pas à jour et offre peu de transparence ; les données concernent des matériaux génériques, alors que l'on sait que les impacts peuvent être différents d'un produit à l'autre, même s'il s'agit d'une même famille (isolant laine de verre par exemple).

Il faut cependant rester méfiant vis-à-vis de Cocon, puisque certaines données sont tout de même issues d'Ecoinvent. On peut voir par exemple sur le graphique ci-dessous la laine de verre de cette base de données, comparée à d'autres laines de verre issues de FDES.



Comparaison Chgmt climatique et Énergie Primaire Totale de différents produits laine de verre avec la laine de verre Ecoinvent (coin inférieur gauche)

## 6.2. Enseignements tirés des projets concernant les impacts environnementaux

### 6.2.1. Impact de l'isolant et d'autres matériaux

Sur les projets étudiés on peut tirer des conclusions générales sur différents matériaux.

En effet, on a pu voir qu'augmenter l'épaisseur de l'isolant afin d'améliorer les performances énergétiques du bâtiment n'a pas d'impact notable au niveau de l'énergie primaire totale des matériaux. Ce qui permet au contraire de ramener l'énergie d'utilisation au même ordre de grandeur que l'énergie grise, et donc d'inciter à diminuer cette dernière en considérant d'autres matériaux, d'autant plus si on considère que le bâtiment est à énergie positive et que son énergie primaire d'utilisation est alors nulle.

Il a également été constaté qu'une construction bois ne nécessite pas plus d'énergie grise qu'une construction classique. On peut envisager que cette énergie soit même moindre, puisque dans notre cas des poutres en bois lamellé-collé qui demandent beaucoup d'énergie pour leur production, comparées à du bois massif. Quoiqu'il en soit, le bilan sur les émissions de CO<sub>2</sub> est sans conteste en faveur d'une construction en bois, si tant est que le recours à ce matériau soit compatible avec d'autres contraintes propres au projet (usage du bâtiment, maintenance, acoustique, tenue structurelle, parti-pris architectural, confort d'été).

Enfin, l'impact de l'acier et de l'aluminium n'est pas à négliger, d'autant plus qu'il s'agit de matériaux souvent utilisés en bardage ou en structure pour des bâtiments type hangar ou remise véhicule. Suivant la taille de ces derniers, pour des raisons structurelles, il pourrait alors être envisagé d'utiliser des alternatives en bois, de même que pour les bardages.

Concernant les vitrages, pour les différents types de paroi auxquels on a eu affaire, on a pu se rendre compte que leur énergie grise n'est pas un critère à prendre en compte, de même que le CO<sub>2</sub> excepté le cas particulier des parois en bois.



### **6.2.2. Rapport entre les matériaux et les consommations**

Sur le bâtiment du CE, en étudiant la variante Béton, on a pu constater que les consommations entre les deux variantes sont relativement proches. En effet le bâtiment étant à utilisation périodique, l'inertie apportée par le béton a peu d'importance. Ainsi il devient alors intéressant de pouvoir jouer sur différents types de matériaux afin de diminuer les impacts environnementaux globaux (construction + consommations) d'un bâtiment.

### **6.2.3. Vigilance par rapport aux résultats**

Etant donné qu'il n'existe pas de FDES pour tous les produits existants, il faut savoir rester critique quant aux résultats, et ce d'autant plus si les valeurs proviennent de différentes bases de données. Afin d'avoir des résultats solides il convient d'effectuer son étude avec une seule et unique base de données ; l'étude consistant généralement à la comparaison de différentes variantes, elle reste une étude qualitative. Ainsi utiliser une autre base de données n'est pas un problème en soi, mais mélanger les différentes bases de données n'aurait pas vraiment de sens.

Si l'on en vient à comparer l'énergie du bâtiment avec l'énergie des consommations, il est alors préférable d'utiliser des données françaises, afin d'avoir une cohérence au niveau du mix énergétique et des coefficients d'énergie primaire.

## 7. Etudes diverses

### 7.1. Déphasage/Inertie

Lorsque l'on parle de thermique dans un bâtiment au niveau du bâti, on pense immédiatement à la résistance ou la conduction thermique des matériaux et des parois, c'est-à-dire à l'isolation. Cependant afin de bien comprendre le fonctionnement thermique d'un bâtiment et de pouvoir maîtriser au mieux non seulement ses consommations mais également son confort, d'autres concepts majeurs sont à prendre en compte.

Le plus connu est **l'inertie thermique**. Il s'agit de la capacité d'un matériau et donc d'une paroi à emmagasiner et ensuite restituer de la chaleur. Cette propriété est directement liée à la capacité thermique, qui est le produit de la masse volumique ( $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>) et la capacité thermique massique du matériau qui correspond à la quantité de chaleur potentielle que peut absorber un matériau ( $C_p$ , kJ/kg.°C).

Ainsi on a : capacité thermique =  $\rho * C_p$

Et par exemple :

- béton = 2160 kJ/m<sup>3</sup>.C
- bois léger = 960 kJ/m<sup>3</sup>.C

L'inertie permet ainsi de restituer les apports énergétiques instantanés (radiation solaire ou apports internes) plus tard dans la journée.

Cette inertie implique donc un **déphasage**, entre le moment où les apports sont maximums et où la restitution est maximum.

Afin d'augmenter cet effet de déphasage, il sera donc nécessaire de jouer sur la **diffusivité thermique** du matériau, c'est-à-dire la vitesse de diffusion de la chaleur à l'intérieur du matériau ( $a$ , m<sup>2</sup>/s). Cette diffusivité est fonction non seulement de la capacité thermique, mais également de la conductivité thermique du matériau ( $\lambda$ , W/m.C).

On a en effet : 
$$a = \frac{\lambda}{\rho * C_p}$$

On comprend ainsi qu'un bon isolant, pourtant léger, pourra obtenir le même déphasage qu'un matériau lourd, mais peu isolant.

	Epaisseur (cm)	Résistance (W/m <sup>2</sup> .C)	Déphasage (h)
Béton	15	0.29	3.9
Polystyrène	20	5.45	3.6

Il faut donc distinguer **le déphasage induit par l'inertie et le déphasage induit par la capacité isolante du matériau**.

Il est possible de **calculer le déphasage d'un matériau à l'aide de la méthode Camia**, qui se base sur la constante de temps qui caractérise le comportement du matériau :

Constante de temps relative (période de 24h) :  $C_r = \frac{e * \rho * C_p}{\lambda * 24}$

Avec :

$e$  = épaisseur du matériau, en m

$C_p$  = capacité thermique massique, en W.h/kg.°C

Déphasage :  $\phi = 1.772 * \sqrt{C_r}$  (en rad) à multiplier par  $24/2\pi$

Le déphasage d'une paroi est égal à la somme des déphasages de chaque matériau.

**Cocon calcule automatiquement le déphasage** lorsque l'on définit une paroi.

En ce qui concerne les aérogares :

Le déphasage induit par l'inertie des matériaux est à choisir au cas par cas.

Si l'on prend par exemple un lieu de circulation, il ne serait pas nécessairement intéressant, principalement à cause des apports internes : lors d'un premier flux de passagers important, les apports seront stockés dans les parois, et libérés quelques heures plus tard ; or à ce moment-là il peut y avoir à nouveau un flux important de passagers, qui aura, en plus des premiers apports, son propre apport énergétique. Il est donc nécessaire de se débarrasser au plus vite de ces apports internes pour ne pas avoir à en traiter plus, plus tard.

Dans certains cas un plancher inerte en contact avec le sol peut être intéressant puisque l'on peut exploiter l'inertie du sol ; dans d'autres cas si l'on sait que la chaleur ne sera restituée que la nuit, on peut envisager une surventilation nocturne pour se débarrasser rapidement de cette chaleur.

Le déphasage induit par la capacité isolante des matériaux est utile lorsque l'on veut se protéger des apports externes ; les apports internes étant également très importants dans une aérogare, il n'y aurait alors aucun effet de déphasage. De plus, pour en revenir aux apports externes, le déphasage sera surtout visible si l'on considère une « boîte » complètement fermée, sans vitrages ; en présence de vitrages, le déphasage induit par les parois opaques sera non seulement masqué par les apports solaires directs, mais également par la chaleur traversant les vitrages, qui induisent peu de déphasage.

Dans tous les cas il s'agit d'une évaluation délicate puisque les quantités de chaleurs restituées et les temps de restitution réels sur l'ensemble d'un ouvrage peuvent être difficilement évalués. L'idéal est de réaliser systématiquement des simulations thermiques dynamiques afin d'être sûr de l'effet de la présence ou non d'inertie.

## 7.2. Outil INAS

L'outil réalisé pour INAS consiste en un tableau comparatif des différents isolants existants. Élaboré par Daniel Blanchard et Didier Massin, il a été complété et revu afin d'en arriver à la version actuelle. Le document est visualisable en Annexe.

Les isolants sont classés en 6 catégories, selon leur origine : Synthétique, Minérale, Végétale, Animale, Recyclé, et Divers.

Le premier tableau est un tableau de synthèse, qui reprend diverses considérations, notamment concernant le bilan écologique, la santé, l'usage, le conditionnement, la durée de vie, ainsi que son application à un bâtiment tertiaire d'ADP.

Les tableaux suivants détaillent pour chaque isolant les caractéristiques thermiques, mécaniques et hygrométriques ainsi que les aspects sanitaires et écologiques.

Ce tableau permet non seulement d'avoir un aperçu rapide des différents isolants existants et de leurs caractéristiques, mais sert également d'aide-mémoire afin de savoir pourquoi on a utilisé tel ou tel isolant à tel endroit.

## 7.3. Outil de calcul d'impact du transport

On a vu précédemment que la prise en compte des impacts dus au transport se fait soit sur la base d'une valeur de 30km, soit d'une valeur précisée par les fabricants, qui, dans les deux cas, ne correspond pas systématiquement à la réalité.

Le problème peut également se poser lorsque l'on désire utiliser un produit fabriqué à l'étranger, qui aura donc peu de chances de faire l'objet d'une FDES.

Le cas s'est déjà présenté pour le bâtiment du S4, où il était question d'utiliser soit de la ouate de cellulose, recouverte par du BA13, soit le produit Labelrock, qui est constitué d'un ensemble de laine de roche et de plaque de plâtre. Bien que la ouate de cellulose soit reconnue pour avoir peu d'impacts environnementaux, celle-ci est produite à Berlin, alors que le Labelrock provient de Clermont Ferrand.

La question s'est alors posée de savoir si utiliser de la ouate de cellulose ne serait finalement pas dévalorisé par les émissions de CO<sub>2</sub> et l'énergie utilisée par toute la phase transport, de Berlin jusqu'à la plateforme de Roissy.

Afin de répondre à ce type de problème, un outil a été créé sous Excel, qui permet d'évaluer les émissions d'équivalent CO<sub>2</sub> lors de cette phase de transport, basé sur les facteurs d'émission de l'ADEME, et d'y ajouter les émissions dues à la fabrication du produit.

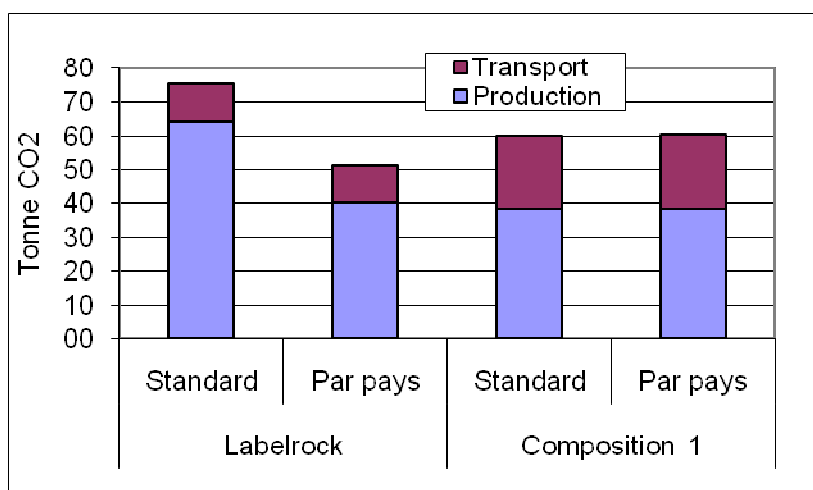
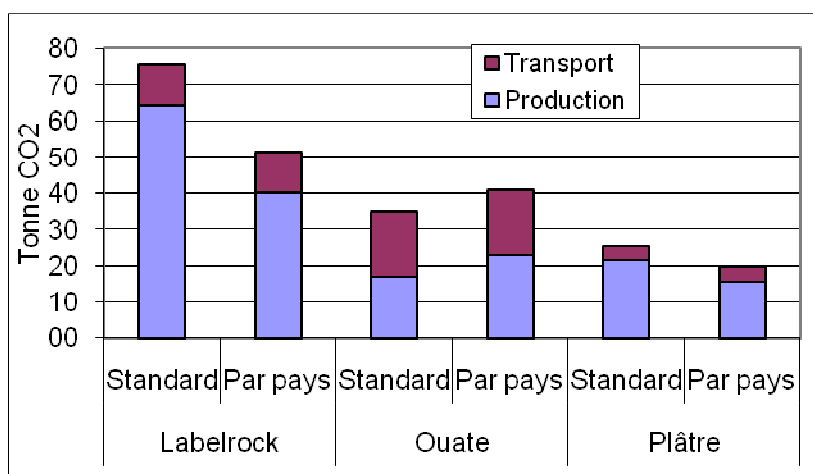
Celles-ci peuvent être soit reprises des FDES, où l'on supposera la part de transport identique pour chaque produit et qu'elle n'aura donc pas d'impact sur le résultat global d'émissions ; soit de la source Oekobilanzdaten, d'origine suisse, consultable par tous et plus simple à utiliser les valeurs étant données par m<sup>3</sup>. Le but de l'étude étant la comparaison relative entre différents produits, le fait qu'il s'agisse d'une base de données étrangère n'est pas un problème, à partir du moment où l'on ne se sert que de cette base.

L'outil créé nécessite la saisie des informations suivantes :

- quantité de matériau (soit via les dimensions, soit le poids)
- énergie grise
- pourcentage d'énergie matière
- les parts d'énergie (gaz et électricité) et le pays de production de l'électricité
- la distance entre le lieu de production et le chantier
- le type de véhicule utilisé

En plus de la saisie des parts d'énergies utilisées selon le pays de production on peut utiliser une valeur standard de facteur d'émissions.

Pour le cas de la ouate de cellulose et du Labelrock on obtient par exemple les résultats suivants, en considérant 50% de gaz et 50% d'élec (pas nécessairement réaliste) (la "Composition 1" est formée de la ouate et de la plaque de plâtre) :



## 8. Bilan

---

### 8.1. Logiciels et impacts environnementaux – Rappels

L'étude des impacts environnementaux au niveau des matériaux de construction est un domaine en pleine expansion et comporte ainsi encore des zones d'ombre et de doute. La quantité d'indices définis (Acidification, Production d'ozone, Epuisement des ressources,...) tend à englober quasiment tous les impacts issus de la fabrication et de l'utilisation d'un produit ; cependant il n'est pas évident de savoir quelle importance apporter à tel ou tel impact, et vouloir comparer tous les impacts (12 au total) semble infaisable. C'est pourquoi **l'énergie primaire totale et le changement climatique semblent les indices les plus représentatifs**, d'autant plus qu'il y a une tendance à ce que les autres indices, si par exemple l'énergie primaire et les émissions de CO<sub>2</sub> sont élevés, le soient également, à une ou deux exceptions près.

Bien que les informations données par les FDES soient toutes consultables, il semble évident qu'un logiciel soit nécessaire pour les exploiter, le but des FDES n'étant pas de comparer les produits les uns par rapport aux autres – ce qui n'est de toute façon pas possible étant donné la différence d'UF – mais bien l'ensemble d'un ouvrage par rapport à un autre.

Cocon semble le programme le plus adapté à INA, non seulement par ses multiples possibilités d'étude, mais également parce que des STD avec Comfie ne seront pas systématiquement faites par les potentiels utilisateurs de Cocon au sein d'INA. A cela s'ajoute les différentes actions, ne concernant pas les impacts environnementaux, réalisables avec Cocon, qui sont rappelées au paragraphe 6.3.3.

### 8.2. Récapitulatif des recommandations

L'étude des impacts environnementaux ne doit pas se faire systématiquement, juste pour le principe de la faire et dire que tel projet va avoir tant d'impacts. L'évaluation des impacts environnementaux doit être une **aide à la décision** pour différentes solutions constructives, le but étant, comme il a déjà été dit, non pas de comparer un produit par rapport à un autre, mais bien des ouvrages dans leur globalité ; par exemple deux types de structures différentes, ou alors choisir entre une rénovation ou une reconstruction complète. Il est donc nécessaire de bien définir les problèmes qui se posent lors d'un projet et ce que l'on cherche à montrer ou à vérifier.

Après cela, la phase la plus importante étant la récupération des données, que ce soit les produits ou leur quantité, il est recommandé de mettre en place la systématisation de la préparation des données, par les architectes par exemple ; c'est-à-dire **mettre à disposition de façon claire toutes les informations nécessaires à la réalisation d'une étude** d'impacts environnementaux (composition des parois, épaisseur des produits, surfaces). Il ne faut pas oublier que, contrairement à une STD, tous les éléments architecturaux doivent être pris en compte.

Une fois l'étude faite il faut non seulement interpréter les résultats, et les mettre en corrélation par exemple avec l'énergie d'occupation du bâtiment, mais également **avoir un regard critique quant à la précision des résultats**. Si les données concernant un matériau ne sont pas disponibles, on peut essayer de cerner son impact en encadrant son impact avec des matériaux supposés équivalents.

Utiliser une base de données étrangère n'est pas un problème en soi si toutes les données concernant tous les matériaux proviennent de cette même base, le but étant une étude relative. Il faut cependant savoir que les FDES vont de plus en plus s'imposer, puisqu'elles deviendront obligatoires dans les années à venir, et qu'à elles seules elles devraient alors être suffisantes pour l'ensemble d'un projet.

Enfin, il paraît nécessaire de rappeler que **les impacts environnementaux ne sont pas à étudier indépendamment des autres considérations** à prendre en compte lors de la conception d'un bâtiment. Il peut s'agir non seulement des consommations d'énergie lors de l'occupation du bâtiment, mais également du confort et du ressenti des occupants, ou encore de la luminosité ou de la qualité de l'air intérieur.

## 8.3. Usage de Cocon

### 8.3.1. Précautions d'emploi

Puisque Cocon apparaît comme étant le plus adapté aux besoins d'INA, il est nécessaire de rappeler les bonnes pratiques de son utilisation. Dans l'ensemble très facile d'utilisation, il n'est pas réellement possible de faire des erreurs, mis à part en omettant des données ; c'est donc à l'utilisateur d'être particulièrement vigilant, le programme ne prévenant pas des éventuelles incohérences saisies. Il convient alors de **vérifier que toutes les parois ont bien été saisies, mais également que les surfaces sont équivalentes entre les différentes variantes**. Il faudra donc uniquement porter une attention particulière aux produits utilisés, certains provenant de bases suisses. Ceci est vérifiable par la source indiquée à gauche du produit sélectionné, et il est également possible, dans les options, de « refuser » les produits appartenant à une certaine source ; ils seront toujours sélectionnables, mais apparaîtront barrés.

### 8.3.2. Fonctions à venir

Comme cela a été dit, Cocon est en constante évolution. Dans les prochaines versions il devrait ainsi être possible de :

- ne pas prendre en compte l'énergie matière ;
- substituer les distances de transport aux valeurs par défaut ;
- calculer le point de rosée dans une paroi ;
- prendre en compte les équipements électriques ;

Cela permettra ainsi de se limiter certaines incohérences liées aux FDES, de prendre en compte plus d'éléments, et d'intégrer des calculs d'humidité.

### 8.3.3. Rappel des actions possibles et intéressantes pour INA

Pour finir, voici un récapitulatif de ce qui est faisable actuellement avec Cocon et qui pourra être utilisé par les différents pôles d'INA :

- **calculs thermiques rapides** : déphasage d'une paroi, quelle épaisseur pour obtenir telle résistance ou inversement
- **comparaison des impacts** : sur des variantes d'un bâtiment, d'une paroi
- se rendre compte du **poids relatif des différentes classes de parois** (Murs, Couvertures, Dalles et planchers,...)

## 8.4. Enseignements et suites à donner au stage

Pour conclure, voici une synthèse des enseignements à tirer de ce stage pour INA et comment ses résultats pourront être utilisés par la suite :

### Enseignements sur l'usage des outils :

- se concentrer sur l'énergie primaire totale et les émissions de CO<sub>2</sub>, mais rester vigilant à ce que certains indicateurs ne soient pas réducteurs ;
- déduire l'énergie matière lorsque des matériaux en bois sont utilisés ;

- faire attention aux parties architecturales qui ne sont généralement pas prises en compte par les études thermiques ;

#### Enseignements sur les résultats des études :

- l'énergie grise peut représenter de 10 à 55% de l'énergie d'utilisation du bâtiment en performance RT 2005 (selon type de bâtiment) et plus de 45% en performance BEPAS/BEPOS ;
- le choix de la structure bois n'a pas d'impact sur l'énergie grise mais un impact important pour les émissions de CO<sub>2</sub> ;
- renforcer l'isolation d'un bâtiment a un impact négligeable aussi bien en énergie grise qu'en CO<sub>2</sub> ;
- certains matériaux à usage spécifique et donc difficilement remplaçables ont un impact non négligeable : étanchéité, polyuréthane
- selon le type de paroi opaque, le pourcentage de vitrage n'a pas d'impact négatif
- les différentes solutions structurelles (béton, acier, bois) ont peu de différence au niveau de l'énergie grise, mais au niveau du changement climatique le bois est de loin le matériau le plus intéressant

#### Les questions à se poser sur les futurs projets :

- faut-il démolir ou faire une rénovation lourde ?
- peut-on éviter les matériaux très impactants tels que l'aluminium, l'acier ou le polyuréthane ?
- pouvons-nous concevoir tout ou partie de l'ouvrage en structure bois ? (En tenant compte des autres critères : usage, maintenance, acoustique, structure, confort d'été..)

#### Récapitulatif des suites à donner :

- formation en interne sur le logiciel Cocon
- savoir qui utilisera Cocon
- faire en sorte dès le départ que l'on se pose les bonnes questions pour chaque nouveau projet pour envisager une évaluation

## 9. Références

---

*Analyse de cycle de vie – Bilan environnemental comparé*, ACOB (Association Française des Fabricants de Charpentes en Béton), février 2009

*Éco-conception des bâtiments*, Bruno Peuportier, 2003

*Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie*, ADEME, mai 2005

*L'énergie dans le bâtiment : les différentes approches*, Claire Cornillier – FCBA (Forêt, Cellulose, Bois construction, Ameublement), octobre 2009

*L'isolation thermique écologique*, J-P Oliva et Samuel Courgey, 2010

*Mesurer l'impact environnemental d'un bâtiment*, Entreprises & Construction Durable, octobre 2005

*Norme FD P01-015 : Fascicule de données énergie et transport*

*Norme NF EN ISO 14044 : Analyse du cycle de vie*

*Norme NF P01-010 : Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction*

*Norme NF P01-020-1 : Qualité environnementale des produits de construction et des bâtiments*

*Revue critique des FDES/ACV*, Réseau écobatir

*Remarques sur les FDES et la norme NF P01-010*, Serge Sidoroff



# ANNEXES

---

## 9.1. Définition des impacts environnementaux selon NF P01-010

**Energie primaire totale** : Représente la somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles, telles que : le gaz naturel le pétrole, le charbon, le minerai d'uranium, la biomasse, l'énergie hydraulique, le soleil, le vent, la géothermie ; et ce à toutes les étapes de l'ACV.

On l'appelle souvent **l'énergie grise** à tort, celle-ci désignant précisément l'énergie primaire non renouvelable.

**Energie renouvelable** : Part de l'énergie primaire totale issue des énergies suivantes :

**Energie non renouvelable** : = énergie primaire totale – énergie renouvelable.

**Epuisement de ressources** : Prend en compte les consommations des ressources énergétiques ou non énergétiques (sauf l'eau). Une valeur supérieure à 1 pour une ressource indique que l'on consomme une ressource plus rare que l'antimoine. Si la valeur est très faible, soit inférieure à 0,001, on considère la ressource comme non épuisable à l'échelle humaine.

**Consommation d'eau** : Consommation totale d'eau sur le cycle de vie, toutes sources confondues.

**Déchets solides** : Pas impactant sur l'environnement en soi, mais représentatif des installations qui seront nécessaires à leur traitement.

**Changement climatique** : Contribution du produit à la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre.

**Acidification atmosphérique** : Prend en compte les composés émis qui sont susceptibles de se transformer en acides et ensuite lessivés par les précipitations (pluies acides).

**Pollution de l'air** : Evalue les impacts toxiques et écotoxiques des émissions dans l'air, en considèrent le volume d'air nécessaire à diluer les émissions du produit, en se basant sur les valeurs limites de la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement.

**Pollution de l'eau** : Même principe que pour l'air.

**Destruction de la couche d'ozone stratosphérique** : Prend en compte les émissions dans l'air susceptible de réagir avec l'ozone de la stratosphère (notamment les chlorofluocarbures (CFC)).

**Formation d'ozone photochimique** : Contribution des émissions dans l'air des composés susceptibles de participer à la formation d'ozone dans les basses couches de l'atmosphère, qui est alors un gaz dangereux.

## 9.2. Calcul du transport selon FD P01-015 – Fascicule de données

La méthode de calcul pour la prise en compte des impacts dus au transport dans les FDES est basée sur la consommation de gasoil du véhicule.

En partant des hypothèses se trouvant dans le tableau ci-après, la formule suivante est utilisée :

$$\text{quantité de gasoil} = \frac{38}{100} * \text{km} * \left( \frac{1}{3} * \frac{C_r}{24} + \frac{2}{3} + 0,3 * \frac{2}{3} \right) * N$$

avec :

km = distance de transport du produit, en km

$C_r$  = charge réelle dans le camion, comprenant la masse des emballages et des palettes

N = nombre de camions nécessaires pour transporter cette quantité

Consommations d'énergie pour le transport par route

		Source
Consommation de gasoil pour un camion plein	38 l pour 100 km	INRETS
Consommation de gasoil pour un camion vide	2/3*38 l pour 100 km	INRETS
Charge utile du camion	24 tonnes	INRETS
Retour à vide des camions	30 %	INRETS
Consommation linéaire en fonction de la charge, pour les charges intermédiaires		
Densité du carburant gasoil = 0,84		

Une fois la quantité de gasoil obtenu, un tableau présenté dans le fascicule détaille les émissions, les indicateurs énergétiques et les consommations, énergétiques ou non, par Litre de gasoil.

Les valeurs standard utilisées pour les FDES sont les suivantes :

- livraison : 30 km
- déchets dangereux : 100 km
- déchets non dangereux et inertes : 30 km

La distance pour la livraison peut être modifiée par les fabricants et doit être précisée dans leur FDES.

Concernant les autres types de transport, les valeurs sont calculées à partir du tableau suivant :

Consommations d'énergie pour les transports ferroviaire, maritime et fluvial

	Consommation	Source
Transport ferroviaire	France : 10 % de diesel et 90 % d'électricité	SNCF
	Europe : 20 % de diesel et 80 % d'électricité	ETH
	Diesel : 0,0056 litre/tonne.km <sup>a)</sup>	ETH
	Électricité : 0,022 kWh/tonne.km	ETH
Transport maritime	Fuel lourd : 0,0026 kg/tonne.km	ETH
	Hypothèses :	
	capacité du tanker > 80 000 tonnes	
	puissance : 0,11 kW/tonne	
	fuel lourd : 0,35 kg/kWh	
Transport fluvial	Diesel : 0,0057 litre/tonne.km	VNF <sup>b)</sup>
a) Densité du carburant diesel = 0,84.		
b) VNF : Voies Navigables de France.		

### 9.3. Calcul des 6 notes de Cocon

Les notes calculées par Cocon pour chaque paroi ou chaque bâtiment ont été définies par l'auteur et n'ont aucun caractère réglementaire ou officiel.

La majorité est calculée par interpolation linéaire à l'aide d'un seuil minimum et un seuil maximum précisés dans le tableau ci-dessous. Les notes sont elles comprises entre 0 et 20.

L'épuisement des ressources est calculé selon la formule indiquée dans le tableau, avec  $ep$  = épuisement des ressources en kea.

Indicateurs	Unité	Note	Seuil min	Seuil max
Énergie grise	kWh/m <sup>2</sup>	X	0	300
Changement climatique	kg eq CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	X	-150	150
Épuisement des ressources	kea	$=1/\exp(2*ep)$	X	X
Déphasage thermique	h	X	0	12
Résistance thermique	m <sup>2</sup> .K/W	seuil min et max en fonction du label visé	X	X
Inertie quotidienne	kJ/m <sup>2</sup> .K	X	0	250



La consigne de température en hiver des locaux techniques est constante tout au long de l'année.

La consigne de température en été, lorsque la zone n'est pas climatisée, est de 100°C. Si la valeur était laissée à 0, la zone serait considérée comme devant être refroidie à 0°C.

### Occupation

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H		0	0	0	0	0	0	0 H			0	0	0	0	0
1 H		0	0	0	0	0	0	1 H		0	0	0	0	0	0
2 H		0	0	0	0	0	0	2 H		0	0	0	0	0	0
3 H		0	0	0	0	0	0	3 H		0	0	0	0	0	0
4 H		0	0	0	0	0	0	4 H		0	0	0	0	0	0
5 H		0	0	0	0	0	0	5 H		0	0	0	0	0	0
6 H		0	0	0	0	0	0	6 H		0	0	0	0	0	0
7 H		0	0	0	0	0	0	7 H		0	0	0	0	0	0
8 H		0	0	0	0	0	0	8 H		0	0	0	0	0	0
9 H	50	50	50	50	50	0	0	9 H		0	0	0	0	0	0
10 H	50	50	50	50	50	0	0	10 H		0	0	0	0	0	0
11 H	50	50	50	50	50	0	0	11 H		0	0	0	0	0	0
12 H	50	50	50	50	50	0	0	12 H		0	0	0	0	0	0
13 H	50	50	50	50	50	0	0	13 H		0	0	0	0	40	40
14 H	50	50	50	50	50	0	0	14 H		0	0	0	0	40	40
15 H	50	50	50	50	50	0	0	15 H		0	0	0	0	40	40
16 H	50	50	50	50	50	0	0	16 H		0	0	0	0	40	40
17 H	50	50	50	50	50	0	0	17 H		0	0	0	0	40	40
18 H	0	0	0	0	0	0	0	18 H	70	70	70	70	70	40	40
19 H	0	0	0	0	0	0	0	19 H	70	70	70	70	70	40	40
20 H	0	0	0	0	0	0	0	20 H	70	70	70	70	70	40	40
21 H	0	0	0	0	0	0	0	21 H	70	70	70	70	70	40	40
22 H	0	0	0	0	0	0	0	22 H	70	70	70	70	70	40	40
23 H	0	0	0	0	0	0	0	23 H	70	70	70	70	70	40	40
24 H	0	0	0	0	0	0	0	24 H	0	0	0	0	0	0	0

### Bureaux

### Activités

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H							
1 H		0	0	0	0	0	0
2 H		0	0	0	0	0	0
3 H		0	0	0	0	0	0
4 H		0	0	0	0	0	0
5 H		0	0	0	0	0	0
6 H		0	0	0	0	0	0
7 H		0	0	0	0	0	0
8 H		0	0	0	0	0	0
9 H		0	0	0	0	0	0
10 H		0	0	0	0	0	0
11 H		0	0	0	0	0	0
12 H		0	0	0	0	70	70
13 H		0	0	0	0	70	70
14 H		0	0	0	0	70	70
15 H		0	0	0	0	70	70
16 H		0	0	0	0	70	70
17 H		0	0	0	0	70	70
18 H	50	50	50	50	50	70	70
19 H	50	50	50	50	50	70	70
20 H	50	50	50	50	50	70	70
21 H	50	50	50	50	50	70	70
22 H	50	50	50	50	50	70	70
23 H	50	50	50	50	50	70	70
24 H	0	0	0	0	0	0	0

### Salle Polyvalente



## Puissance dissipée

Wm²	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Wm²	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H								0 H							
1 H		0	0	0	0	0	0	1 H		0	0	0	0	0	0
2 H		0	0	0	0	0	0	2 H		0	0	0	0	0	0
3 H		0	0	0	0	0	0	3 H		0	0	0	0	0	0
4 H		0	0	0	0	0	0	4 H		0	0	0	0	0	0
5 H		0	0	0	0	0	0	5 H		0	0	0	0	0	0
6 H		0	0	0	0	0	0	6 H		0	0	0	0	0	0
7 H		0	0	0	0	0	0	7 H		0	0	0	0	0	0
8 H		15	15	15	15	15	0	8 H		0	0	0	0	0	0
9 H		15	15	15	15	15	0	9 H		0	0	0	0	0	0
10 H		15	15	15	15	15	0	10 H		0	0	0	0	0	0
11 H		15	15	15	15	15	0	11 H		0	0	0	0	0	0
12 H		15	15	15	15	15	0	12 H		0	0	0	0	6	6
13 H		15	15	15	15	15	0	13 H		0	0	0	0	6	6
14 H		15	15	15	15	15	0	14 H		0	0	0	0	6	6
15 H		15	15	15	15	15	0	15 H		0	0	0	0	6	6
16 H		15	15	15	15	15	0	16 H		0	0	0	0	6	6
17 H		15	15	15	15	15	0	17 H		6	6	6	6	6	6
18 H		15	15	15	15	15	0	18 H		6	6	6	6	6	6
19 H		0	0	0	0	0	0	19 H		6	6	6	6	6	6
20 H		0	0	0	0	0	0	20 H		6	6	6	6	6	6
21 H		0	0	0	0	0	0	21 H		6	6	6	6	6	6
22 H		0	0	0	0	0	0	22 H		6	6	6	6	6	6
23 H		0	0	0	0	0	0	23 H		6	6	6	6	6	6
24 H		0	0	0	0	0	0	24 H		0	0	0	0	0	0

Bureaux

Activités

Le scénario pour la Salle Polyvalente est le même que pour celui des salles d'Activités.

## Ventilation

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	80	80	80	80	80	80	80	0 H	68	68	68	68	68	68	68
1 H	80	80	80	80	80	80	80	1 H	68	68	68	68	68	68	68
2 H	80	80	80	80	80	80	80	2 H	68	68	68	68	68	68	68
3 H	80	80	80	80	80	80	80	3 H	68	68	68	68	68	68	68
4 H	80	80	80	80	80	80	80	4 H	68	68	68	68	68	68	68
5 H	80	80	80	80	80	80	80	5 H	68	68	68	68	68	68	68
6 H	80	80	80	80	80	80	80	6 H	68	68	68	68	68	68	68
7 H	100	100	100	100	100	80	80	7 H	68	68	68	68	68	68	68
8 H	100	100	100	100	100	80	80	8 H	68	68	68	68	68	68	68
9 H	100	100	100	100	100	80	80	9 H	68	68	68	68	68	68	68
10 H	100	100	100	100	100	80	80	10 H	68	68	68	68	68	68	68
11 H	100	100	100	100	100	80	80	11 H	68	68	68	68	68	68	68
12 H	100	100	100	100	100	80	80	12 H	68	68	68	68	68	68	68
13 H	100	100	100	100	100	80	80	13 H	68	68	68	68	68	87	87
14 H	100	100	100	100	100	80	80	14 H	68	68	68	68	68	87	87
15 H	100	100	100	100	100	80	80	15 H	68	68	68	68	68	87	87
16 H	100	100	100	100	100	80	80	16 H	68	68	68	68	68	87	87
17 H	100	100	100	100	100	80	80	17 H	100	100	100	100	100	87	87
18 H	80	80	80	80	80	80	80	18 H	100	100	100	100	100	87	87
19 H	80	80	80	80	80	80	80	19 H	100	100	100	100	100	87	87
20 H	80	80	80	80	80	80	80	20 H	100	100	100	100	100	87	87
21 H	80	80	80	80	80	80	80	21 H	100	100	100	100	100	87	87
22 H	80	80	80	80	80	80	80	22 H	100	100	100	100	100	87	87
23 H	80	80	80	80	80	80	80	23 H	100	100	100	100	100	87	87
24 H	80	80	80	80	80	80	80	24 H	68	68	68	68	68	68	68

Bureaux

Activités

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H							
1 H	30	30	30	30	30	30	30
2 H	30	30	30	30	30	30	30
3 H	30	30	30	30	30	30	30
4 H	30	30	30	30	30	30	30
5 H	30	30	30	30	30	30	30
6 H	30	30	30	30	30	30	30
7 H	30	30	30	30	30	30	30
8 H	30	30	30	30	30	30	30
9 H	30	30	30	30	30	30	30
10 H	30	30	30	30	30	30	30
11 H	30	30	30	30	30	100	100
12 H	30	30	30	30	30	100	100
13 H	30	30	30	30	30	100	100
14 H	30	30	30	30	30	100	100
15 H	30	30	30	30	30	100	100
16 H	30	30	30	30	30	100	100
17 H	80	80	80	80	80	100	100
18 H	80	80	80	80	80	100	100
19 H	80	80	80	80	80	100	100
20 H	80	80	80	80	80	100	100
21 H	80	80	80	80	80	100	100
22 H	80	80	80	80	80	100	100
23 H	30	30	30	30	30	30	30
24 H							

Salle polyvalente

La ventilation en dehors des périodes d'occupation correspond aux infiltrations. Ainsi les scénarios de ventilation des locaux techniques et de la zone circulation sont constants tout au long de l'année.

Tous ces scénarios sont hypothétiques, étant donné que le bâtiment du CE est atypique en ce qui concerne son occupation.



## 9.5. Calcul d'énergie primaire pour les consommations

Les calculs ont été réalisés sous Excel, avec les hypothèses suivantes :

- Éclairage : les puissances par m<sup>2</sup> sont celles précisées dans le tableau de scénario pour Comfie ; pour les variantes BEPAS/BEPOS du SSLIA on déduit encore 20% en supposant un meilleur contrôle et un meilleur apport de lumière naturelle
- Ventilation : on suppose un coefficient de 0.45 W/m<sup>3</sup>/h en insufflation et 0.3 W/m<sup>3</sup>/h en extraction ; les débits d'air neuf sont également extraits puisqu'on est en présence d'un système double-flux
- Chaud/Froid : on suppose que les systèmes des deux bâtiments ont un COP de 3 et on ne prend pas en compte d'autres pertes ; ceci nous permet d'obtenir l'énergie finale
- Energie primaire : tous les systèmes étant électriques, on utilise un coefficient de 2,58 pour obtenir l'énergie primaire ; celui-ci correspond au mix énergétique français.

On obtient ainsi les résultats suivants :

par an	Bois			Béton		
	Besoins	Conso finales	Energie primaire	Besoins	Conso finales	Energie primaire
	kWh	MWh	MWh	kWh	MWh	MWh
<b>Chaud</b>	52 081	17,4	44,8	54156	18,1	46,6
<b>Froid</b>	21 517	7,2	18,5	9671	3,2	8,3
<b>Elec</b>	25 107	25,1	64,8	25107	25,1	64,8
<b>Total</b>	98 705	49,6	128,1	88 934	46,4	119,7

*Bâtiment du CE*

par an	RT 2005			BBC		
	Besoins	Conso finales	Energie primaire	Besoins	Conso finales	Energie primaire
	kWh	MWh	MWh	kWh	MWh	MWh
<b>Chaud</b>	35 683	11,9	30,7	21 923	7,3	18,9
<b>Froid</b>	6 630	2,2	5,7	4 710	1,6	4,1
<b>Elec</b>	47 723	47,7	123,1	32 236	32,2	83,2
<b>Total</b>	90 036	61,8	159,5	58 869	41,1	106,1

	BEPAS			BEPOS		
	Besoins	Conso finales	Energie primaire	Besoins	Conso finales	Energie primaire
	kWh	MWh	MWh	kWh	MWh	MWh
	9 192	3,1	7,9	8 910	3,0	7,7
	5 075	1,7	4,4	5 083	1,7	4,4
	22 425	22,4	57,9	22 425	22,4	57,9
	36 692	27,2	70,1	36 418	27,1	69,9

*Bâtiment du SSLIA*