

Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg & COSTIC

GENIE CLIMATIQUE ET ENERGETIQUE

SYNTHESE DU PROJET DE FIN D'ETUDE

ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES MAISONS PASSIVES DE LA PLATEFORME INCAS



Projet de Fin d'Etudes réalisé au Centre d'Efficacité Energétique des Systèmes,
Mines ParisTech & ARMINES

par Marie-Lise PANNIER

Tuteurs entreprises : Bruno PEUPORTIER et Charlotte ROUX
Tuteur école : Cédric BEAUMONT

AOUT 2014

Fiche d'objectif

Le projet de fin d'étude, réalisé dans le laboratoire de recherche « Centre d'Efficacité Energétique des Systèmes » (CES) de l'école de Mines de Paris, concerne :

« L'analyse de cycle de vie appliquée aux maisons passives de la plateforme INCAS »

Ce projet sur l'analyse de cycle de vie s'inscrit dans le cadre du projet de recherche BENEFIS (Bilan ENergétique et Environnemental Flable, Simple et reproductible des bâtiments). Le but de BENEFIS est de rendre plus accessible l'écoconception et l'évaluation environnementale des bâtiments par l'analyse de cycle de vie. Plus particulièrement la contribution est apportée à la sous-tâche 4.1 concernant la reproductibilité des ACV de bâtiments réels.

L'objectif principal du projet de fin d'étude est de **comparer deux outils d'analyse de cycle de vie** (ACV) : l'outil novaEQUER développé au CES et l'outil ELODIE développé au CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment).

Des bâtiments très performants énergétiquement sont utilisés pour la comparaison des outils d'ACV ; il s'agit des maisons passives de la plateforme expérimentale INCAS construites sur le site de l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) au Bourget du Lac. Ces bâtiments strictement identiques du point de vue de leur géométrie sont réalisés dans différents matériaux ce qui permet de **comparer les performances environnementales de différents modes constructifs**.

L'étape préalable à la comparaison des outils d'ACV consiste en la modélisation des maisons INCAS. Ces bâtiments entièrement instrumentés ont déjà permis de tester différents outils de simulation thermique. Ainsi des modélisations des maisons existent déjà. Ces **modélisations** sont **affinées pour harmoniser les unités fonctionnelles** et faciliter l'ACV. Une attention particulière est portée aux compositions de parois et aux scénarios de fonctionnement.

Il s'agit ensuite de comparer les outils d'ACV et d'**analyser les provenances des écarts** de résultats. Les principales sources d'erreurs sont liées aux bases de données (différentes pour novaEQUER et ELODIE), aux différences de points de vue à l'origine des méthodes de calculs et à la modélisation des bâtiments.

Si l'origine des écarts peut-être identifiée, des solutions sont envisagées pour **réduire les écarts**, et donc pour fiabiliser et améliorer les outils existants d'ACV. Il ne s'agit pas d'obtenir des résultats identiques avec les différents outils d'ACV mais plutôt de rendre leurs résultats cohérents et de voir si les outils donnent les mêmes meilleures variantes lorsqu'ils sont utilisés pour comparer plusieurs bâtiments.

Résumé

Résumé

L'analyse de cycle de vie (ACV), par son approche multicritères sur l'ensemble du cycle de vie, est particulièrement adaptée à l'évaluation de la performance environnementale dans le bâtiment. Or ce secteur va jouer un rôle clé pour relever les défis énergétiques et environnementaux actuels. Il est donc important de disposer d'outils d'ACV fiables, adaptés au bâtiment. Actuellement, les outils existants possèdent leurs propres méthodologies et bases de données ce qui peut entraver la reproductibilité des résultats. Cette synthèse regroupe les hypothèses prises pour la simulation thermique dynamique (étape préalable) et pour l'ACV de maisons. Elle détaille les résultats d'ACV réalisées avec les outils novaEquer et Elodie sur des bâtiments réels : les maisons passives INCAS. Des tests de reproductibilité ont été réalisés en comparant différents modes constructifs, énergies pour le chauffage et en étudiant l'influence d'une production locale d'énergie. Enfin, cette synthèse présente les écarts identifiés entre les outils et indique si possible leurs origines. Cela permettra d'émettre des recommandations pour fiabiliser les études d'ACV des bâtiments.

Mots clés : Analyse de Cycle de Vie, Evaluation environnementale des bâtiments, Maison passive, Reproductibilité des résultats, novaEquer, Elodie

Abstract

Life cycle assessment (LCA) is particularly adapted for the environmental assessment of buildings through its multi criterial approach on the entire life cycle of the building. This sector is a key sector to solve today's energy and environment challenges. So it's useful to have reliable and building adapted LCA tools. Different LCA tools currently exist but each of them has its own methodology and database making the results reproducibility difficult. This report first presents the assumptions made for LCA and dynamic thermal simulation, which is the preliminary step for buildings LCA. It also presents the LCA results of simulation made with the tools novaEquer and Elodie on existing buildings: the INCAS passive houses. Reproducibility tests were carried out to compare different construction material, energy for heating and the impact of local energy production. Finally, the report highlights the results disparities and if possible gives their reasons in order to guide recommendations and to improve buildings LCA reliability.

Keywords: Life Cycle Assessment, Building environmental assessment, Passive house, Reproducibility of results, novaEquer, Elodie

Zusammenfassung

Durch ihre auf dem ganzen Lebenszyklus multikriterielle Betrachtungsweise ist das Lebenszyklusanalyse (LZA) an die umweltliche Gebäudebewertung besonders gut angepasst. Doch der Baubranche erwies sich als Schlüsselbereich, um den heutigen energetischen und umweltlichen Herausforderungen anzunehmen. Es ist deshalb notwendig über zuverlässige LZA-Tools für den Gebäude zu verfügen. Dadurch dass zurzeit jeden Tools ihre eigene Methodologie und Datenbank besitzt, kann die Ergebnisse Reproduzierbarkeit behindert werden. In diesem Bericht werden zuerst die Hypothesen sowohl für die thermisch dynamische Simulation als auch für die LZA Simulationen vorausgesetzt. Er enthält ebenfalls die Ergebnisse der mit dem Tools novaEquer und Elodie durchgeführte LZA. Die Simulationen basieren auf existierende Gebäude: die INCAS Passivhäusern. Als Reproduzierbarkeitstests werden verschiedene Bauweise, Heizungsenergien sowie der Einfluss einer lokalen Energieproduktion betrachtet. Schließlich werden Unterschiede zwischen den Tools und möglicherweise ihre Ursprünge festgestellt. Daraus erfolgen Empfehlungen, um LZA-Tools für das Gebäude zuverlässiger zu machen.

Schlüsselworte : Lebenszyklusanalyse, Umweltliche Gebäudebewertung, Passivhaus, Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, novaEquer, Elodie

Synthèse du projet de fin d'étude

Table des matières

1	Introduction et contexte du projet	3
2	Présentation générale	4
2.1	L'analyse de cycle de vie	4
2.2	Projets concernant la reproductibilité des résultats d'ACV du bâtiment	8
2.3	Les outils utilisés.....	9
3	Simulation thermique dynamique des maisons INCAS.....	14
3.1	Présentation des maisons passives de la plateforme INCAS.....	14
3.2	Hypothèses retenues pour la simulation thermique dynamique	15
3.3	Résultats des simulations thermiques dynamiques	21
4	Analyse de cycle de vie des maisons INCAS	26
4.1	Définition des objectifs et frontières de l'étude	26
4.2	Les composants	28
4.3	L'énergie	30
4.4	L'eau	31
4.5	La phase chantier	31
4.6	Remarque	32
5	Résultats et étude de reproductibilité des ACV comparatives	33
5.1	Les variantes vecteurs énergétiques.....	34
5.2	Influence de la présence ou de l'absence de photovoltaïque	41
5.3	Les variantes constructives	43
5.4	Conclusion sur la reproductibilité des résultats.....	46
6	Conclusion	48
	Bibliographie	49
	Sommaire des annexes.....	50

1 Introduction et contexte du projet

Le bâtiment reste le secteur économique français ayant la plus forte consommation d'énergie finale. En 2012, 68,7 Mtep d'énergie finale a été consommé dans le secteur du résidentiel et tertiaire en France, soit 44,5% de la consommation nationale d'énergie finale (1). Il est donc important d'améliorer la performance énergétique des bâtiments en France ; c'est le rôle des réglementations thermiques successives, du diagnostic de performance énergétique (DPE), des différents labels...

Cependant, la performance environnementale de ce secteur doit aussi être améliorée. En effet, plus de 73% des déchets produits en France en 2010 provenaient du secteur du BTP (2). Pour son utilisation (combustion pour le chauffage, eaux usées, etc.), le bâtiment contribue aussi à la pollution de l'air, de l'eau, du sol... Tout cela peut impacter la santé humaine, l'écosystème ou encore contribuer à l'épuisement des ressources.

La maîtrise de la performance environnementale passe par une optimisation de la démarche de conception. Il est donc important de disposer d'outils multicritères, suffisamment fiables et permettant de mettre en évidence les sources des impacts environnementaux liés au secteur du bâtiment.

Cela peut passer par une démarche d'analyse de cycle de vie qui permet justement d'évaluer les impacts environnementaux d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie.

Le présent projet de fin d'étude, réalisé du 3 février au 31 juillet 2014 au Centre d'Efficacité énergétique des Systèmes (CES) à Palaiseau, doit permettre d'apporter une contribution à la fiabilisation d'outils d'analyse de cycle de vie (ci-après noté ACV), dédiés au bâtiment.

Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme de recherche BENEFIS (Bilan ENergétique et Environnemental Fiable, Simple et reproductible des bâtiments) (3), financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche). Cinq partenaires y contribuent : les pôles de recherche ARMINES et CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), l'industriel BOUYGUES Construction, l'association Maison de Qualité et la société IZUBA Energies.

L'objectif principal de BENEFIS est de préparer le passage à l'approche performancielle dans le secteur du bâtiment. Il s'agit de rendre accessible et fiable la démarche d'écoconception par l'ACV à tous les acteurs du bâtiment.

Pour ce faire, les partenaires de BENEFIS proposent de lever des verrous bloquant l'application courante de l'ACV en :

- Adaptant l'ACV au cas des bâtiments énergétiquement performants ;
- Simplifiant les modèles d'aide à la conception ;
- Améliorant la reproductibilité des études ;
- Facilitant l'analyse de l'exploitation des résultats.

A l'issue du projet, de nouvelles versions des outils d'ACV Equer et Elodie, développés respectivement par ARMINES et par le CSTB, seront mises sur le marché.

Dans le cadre de ce PFE, une contribution est apportée à la sous-tâche 4.1 du programme BENEFIS concernant l'amélioration de la reproductibilité des ACV sur les nouvelles versions des outils. L'objectif de cette sous-tâche est d'améliorer la confiance des acteurs du bâtiment dans les outils d'ACV. Pour ce faire, les résultats d'ACV donnés par les deux outils novaEquer et Elodie seront comparés. Si les provenances des écarts peuvent être déterminées, des solutions pour les réduire sont envisagées.

Les bâtiments choisis pour l'étude sont les maisons passives de la plateforme INCAS. Une étape préalable consiste en leur modélisation afin de réaliser des simulations thermiques dynamiques. Une étude des performances énergétiques des maisons INCAS est donc menée avant d'évaluer leurs performances environnementales.

2 Présentation générale

2.1 L'analyse de cycle de vie

Les informations détaillées ci-après sont principalement issues du livre « Analyse du cycle de vie, Comprendre et réaliser un écobilan » des Presses polytechniques et universitaires romandes (4) et du manuel d'utilisation de l'outil EQUER (5) et (6).

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux d'un produit ou d'un procédé sur l'ensemble du cycle de vie de ce produit, autrement dit « du berceau à la tombe ». Les impacts environnementaux sont définis à partir d'un bilan des substances extraites et rejetées à l'environnement à chaque étape la vie du produit : production, utilisation, traitement de fin de vie.

Des indicateurs, décrivant les principaux problèmes environnementaux, permettent de lier un flux de substance à un impact sur l'environnement.

2.1.1 Objectifs

L'objectif principal de l'ACV est la détermination des étapes du cycle de vie qui pourraient être optimisées pour réduire l'empreinte environnementale d'un produit.

La réduction des impacts liés à une étape de la vie d'un produit peut cependant entraîner la dégradation des performances d'une autre étape. De même la réduction de l'impact d'un indicateur environnemental peut entraîner un déplacement des polluants et contribuer à augmenter l'impact d'autres indicateurs.

L'ACV est donc également utilisée pour vérifier que des améliorations environnementales, réalisées en un point du cycle, ne contribuent pas à un déplacement de pollution.

D'autre part, l'ACV permet de comparer les impacts de différents produits ou procédés. Elle représente alors un critère d'aide à la décision, en plus des aspects financiers, techniques ou sociaux, lorsqu'un choix doit être effectué entre deux variantes d'un produit ayant les mêmes fonctions.

L'utilisation d'indicateurs environnementaux permet enfin de faciliter la communication entre tous les acteurs du projet : bureaux d'étude, maîtres d'ouvrage, architectes, entreprises...

2.1.2 Les étapes d'une ACV

Une analyse de cycle de vie se compose de quatre étapes comme le montre la Figure 1 :

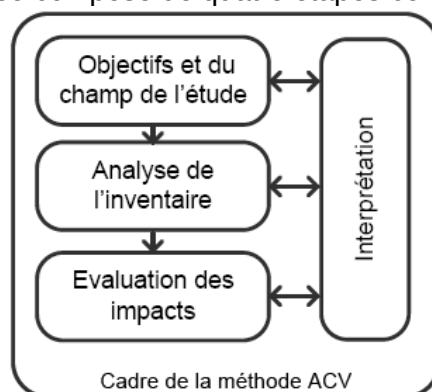


Figure 1 : Les phases de l'analyse de cycle de vie (7)

La démarche de réalisation d'une ACV est décrite avec précision dans la série de normes ISO 14 040. Des exemples d'application sont également donnés. Ces normes font partie de l'ensemble des normes ISO 14 000 concernant les systèmes de management environnemental.

Définition des objectifs et du système

Cette phase est très importante puisqu'elle permet la détermination des objectifs et du champ de l'étude. C'est à ce moment que sont définis la fonction du système, l'unité fonctionnelle, les limites de l'étude, le public de l'étude.... Il faut aussi mentionner les noms des donneurs d'ordre et financeurs afin que le lecteur ait un regard critique sur l'étude.

L'**unité fonctionnelle** comprend la fonction principale et éventuellement les fonctions secondaire du système étudié, la quantité de référence, le niveau de performance, la durée de vie du système, la localisation du système (lieu de fabrication, d'utilisation...).

Voici un exemple d'unité fonctionnelle :

Produit étudié	Unité fonctionnelle
Peinture	Protéger une surface de 1 m ² de mur intérieur pendant 10 ans

Il est important de bien décrire l'unité fonctionnelle pour que les comparaisons entre variantes se fassent sur des bases identiques. Cependant, plus l'unité fonctionnelle est décrite de manière précise, plus le nombre de systèmes répondant à tous les critères est faible. Le nombre de variantes pouvant être comparées s'en trouve donc réduit.

Inventaire des polluants et matières premières

Lors de cette phase, toutes les substances extraites et émises, dans l'air l'eau et le sol, pour la production, l'utilisation et le traitement de fin de vie du produit sont répertoriés.

Tous les procédés et matériaux ayant un lien avec les phases de fabrication, utilisation ou destruction/recyclage du produit sont inventoriés. Il n'est cependant pas possible ni pertinent de prendre en compte toutes les données de l'inventaire (dans quelle mesure la machine qui a fabriqué la machine impacte-t-elle notre système ?). Souvent, une limite est définie à partir de laquelle les données d'inventaires sont négligées. Une autre méthode consiste à observer les flux monétaires liés au système et à ne pas considérer les dépenses très faibles.

Un système matriciel permet de regrouper toutes les données d'inventaire.

Analyse de l'impact

Lors de cette étape, un lien est établi entre les données d'inventaire et les impacts causés sur l'environnement. Pour cela des indicateurs environnementaux sont calculés, ils sont issus du regroupement et de la pondération des flux et substances émis et consommés.

Toutes les substances ayant le même type d'effet sur l'environnement sont regroupées dans des indicateurs orientés « problème », dits de catégorie intermédiaire ou midpoint. Ces indicateurs décrivent un problème environnemental (Figure 2).

Par exemple : si on considère le potentiel de réchauffement climatique global GWP, son calcul est effectué à partir de la sommation des données d'inventaire des gaz à effet de serre pondérés par des coefficients permettant de se ramener à une quantité en kg équivalent de CO₂.

Dans la mesure du possible, les indicateurs de problème sont ensuite reliés à des indicateurs orientés « dommage » ou endpoint, dont le but est d'estimer les dommages potentiels liés aux indicateurs de problèmes (Figure 2). Ce type d'indicateur est plus parlant pour le lecteur d'une ACV, cependant les données sont plus incertaines. En effet, il n'est parfois pas possible d'établir des liens directs entre indicateurs de catégorie intermédiaire et de dommage sur l'environnement puisque les relations ne sont pas toujours sûres ou bien connues.

Différentes méthodologies permettent d'évaluer les impacts environnementaux et d'aboutir au calcul d'indicateurs environnementaux. Certaines n'évaluent que des indicateurs de problèmes et d'autre des indicateurs de problèmes et de dommage.

La commission européenne fournit au travers du JRC (Joint Research Center) des recommandations sur les méthodologies à employer pour différents types d'effets sur l'environnement. Ces recommandations sont consignées dans l'ILCD Handbook (8) (International Reference Life Cycle Data System).

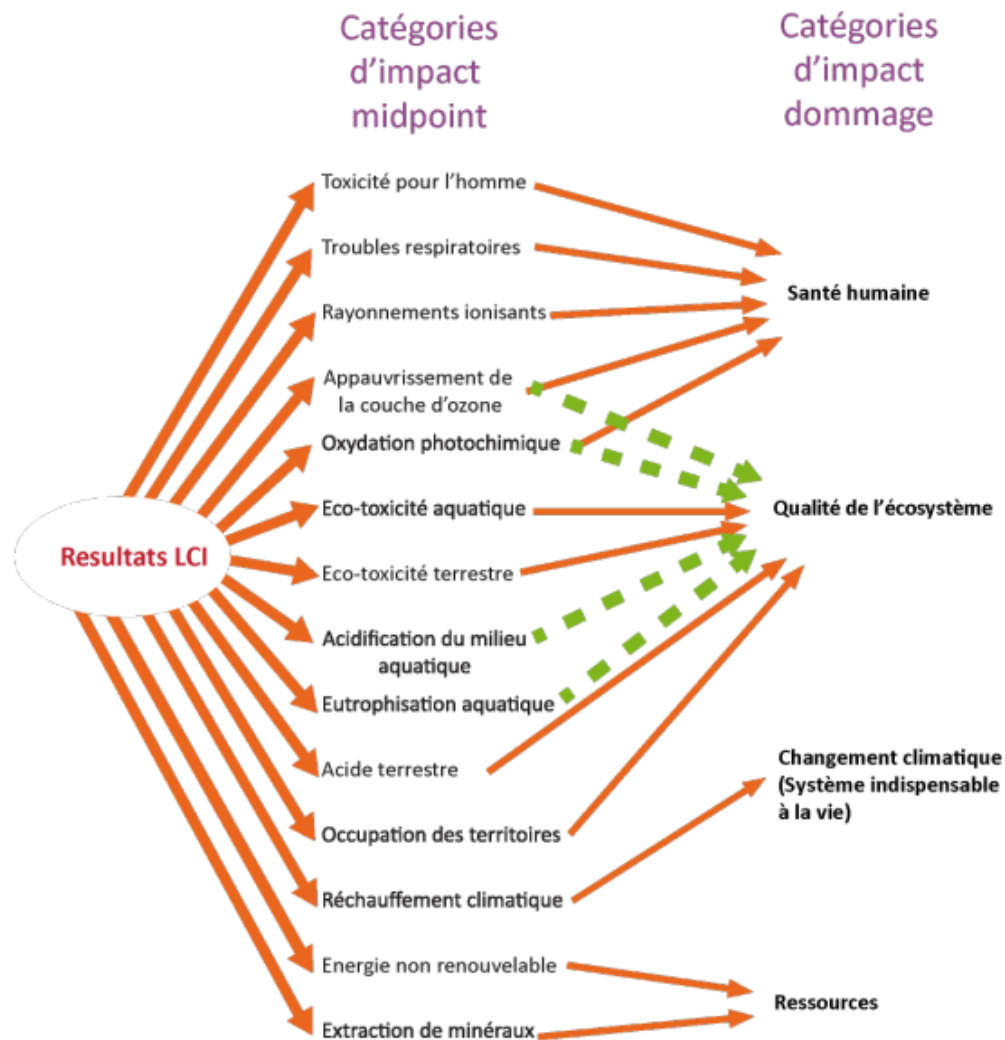


Figure 2 : Passage des données d'inventaire aux indicateurs environnementaux (9)

NB : LCI signifie Life Cycle Impact et correspond à la phase d'inventaire des polluants et matières premières.

Normalisation et agrégation

Une fois l'analyse d'impact effectuée et avant de passer à la phase d'interprétation, il est possible de réaliser une normalisation. Il s'agit de hiérarchiser les indicateurs environnementaux en déterminant l'importance relative des uns par rapport aux autres, tous les indicateurs sont alors ramenés dans une même unité. La normalisation s'obtient en divisant les valeurs d'impacts par une valeur de référence souvent rapportée à un équivalent année-habitant. Pour ce faire, les valeurs généralement utilisées proviennent de différentes sources : CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique), Observatoire de l'énergie, IFEN (Institut Français de l'ENVironnement), ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets RADioactifs), ADEME (Agence

Nationale pour l'Environnement et la Maîtrise de l'Energie), [Jolliet, 2005]. Elles ont été regroupées dans [Peuportier, 2008] (10) et sont présentées dans la Figure 3.

IMPACTS MOYENS PAR HABITANTS ET PAR AN (France)			
thème	unité	Année-habitant	Source
effet de serre	kg CO ₂ eq.	8 680	CITEPA
énergie primaire	kWh	48 670	Observatoire de l'Energie
acidification	kg SO ₂ eq.	62,3	CITEPA
smog	kg C ₂ H ₄ eq.	19,7	CITEPA
eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq.	38,1	IFEN
eau	m ³	339	IFEN
déchets radioactifs	dm ³	0,51	ANDRA
autres déchets	kg eq.	10 400	ADEME
toxicité humaine	DALY	0,0068	Jolliet (Europe)
éco-toxicité	PDF.m ² .an	13 700	Jolliet (Europe)

Figure 3 : Coefficients de normalisation pour se rapporter à un équivalent habitant-an (10)

L'agrégation peut également aider à conclure sur les résultats d'ACV. Le but est d'obtenir un indicateur environnemental unique en pondérant puis en sommant les valeurs d'indicateurs normalisées. Cela peut permettre de simplifier la prise de décision en comparant plusieurs variantes sur la base d'un seul indicateur.

Ces étapes restent cependant facultatives et peuvent être discutables puisque le classement des indicateurs par ordre de priorité est subjectif.

Interprétation

Après avoir obtenus les résultats d'ACV sous forme d'indicateur et éventuellement avoir normalisé les résultats, ceux-ci doivent être interprétés.

Cette phase doit permettre de répondre aux questions posées en amont de l'ACV et de comparer les variantes envisagées.

Lors de l'interprétation, certaines hypothèses, notamment celles concernant la définition de l'unité fonctionnelle, peuvent être remises en question. Ainsi la démarche d'ACV est itérative, les hypothèses prises sont affinées en cours d'étude et les différentes étapes sont réalisées plusieurs fois.

2.1.3 Limites d'une ACV

Bien que l'ACV permette une approche multicritère sur l'ensemble du cycle de vie d'un système, cette démarche présente quelques inconvénients.

La principale limite est la dépendance très forte entre les hypothèses prises (choix de l'unité fonctionnelle et des frontières du système) et les résultats obtenus.

L'origine des données peut aussi constituer une limite, les résultats ne seront pas forcément identiques en fonction des flux inventoriés ou des méthodes choisies pour l'ACV. De même, toutes les données nécessaires à une étude complète ne sont pas toujours disponibles et en phase de conception, certaines informations sur le projet ne sont pas encore définies ; il faut alors faire des approximations, ce qui nuit à la précision des résultats.

Afin d'éviter toutes les mauvaises interprétations, il est nécessaire de bien détailler l'ensemble des hypothèses prises et d'être transparent sur les données utilisées et les méthodes employées.

Il faut aussi bien noter que l'ACV prend en compte des impacts potentiels et non réels, c'est à dire qu'ils ne seront pas nécessairement générés par le système étudié. Toutefois, cela

permet de comparer entre elles différentes variantes et d'estimer laquelle peut induire les plus forts impacts sur l'environnement.

Enfin, les recommandations émanant des résultats d'ACV pour le produit étudié peuvent être en contradiction avec d'autres considérations : économique, liées au confort...

➔ *Rappelons que dans la suite de ce projet de fin d'étude, l'analyse de cycle de vie est appliquée spécifiquement au **domaine du bâtiment**.*

2.2 Projets concernant la reproductibilité des résultats d'ACV du bâtiment

Dans le contexte énergétique et environnemental actuel, les outils permettant d'évaluer la performance environnementale des bâtiments sont amenés être de plus en plus utilisés. Cependant, les différents logiciels présents sur le marché français : novaEquer, Elodie, SimaPro, Team-Bâtiment, E-Licco, Cocon..., possèdent leurs propres bases de données et méthodologies. Cela peut poser des problèmes de reproductibilité des résultats. Afin que les utilisateurs aient confiance dans ces outils, leur fiabilité doit être augmentée. Il est donc nécessaire d'atteindre un bon niveau de reproductibilité des résultats.

Plusieurs travaux de recherche portant sur la comparaison de logiciels et de bases de données d'ACV ont déjà été réalisés. Parmi eux les projets PRESCO (Practical REcommendations for Sustainable CONstruction) en 2005 portant sur les outils Equer, Eco-Quantum, Eco-Soft et SimaPro et COIMBA (Développement d'un outil consensuel pour la CONnaissance de l'IMPact environnemental des BATiments) en 2010 portant sur les outils Equer, Elodie et Simapro.

Suite aux résultats de ces travaux, de premières recommandations ont été faites pour améliorer la reproductibilité des résultats entre outils.

Le projet **BENEFIS** (Bilan ENergétique et Environnemental Flable, Simple et reproductible des bâtiments) (3), s'inscrit dans la continuité du travail d'amélioration de la reproductibilité des résultats. Ce projet de recherche, débuté en 2012, regroupe cinq acteurs du secteur de la construction : les pôles de recherche CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et ARMINES, l'industriel BOUYGUES Construction, l'association Maison de Qualité et la société IZUBA Energies.

L'objectif principal de BENEFIS est de rendre accessible la démarche d'éco-conception par l'ACV à tous les acteurs du bâtiment : maîtrise d'œuvre, architecte, concepteur, entreprise, exploitant...

Pour ce faire, les partenaires de BENEFIS proposent d'améliorer les outils d'ACV novaEquer et Elodie développés respectivement par ARMINES et le CSTB. Les outils devront à terme être adaptés à des bâtiments performants, être simplifiés, permettre une bonne reproductibilité des résultats et faciliter leurs interprétations.

Le projet de recherche est décomposé en 5 tâches comme illustré à la Figure 4.

Dans le cadre de ce PFE, une contribution est apportée à la sous-tâche 4.1 qui doit permettre de tester la reproductibilité des résultats sur des cas d'études réels avec les nouvelles versions des logiciels.

- Tâche 1 Coordination
- Tâche 2 Développements méthodologiques
 - Tâche 2.1 Les aspects énergétiques
 - Tâche 2.2 La simplification
 - Tâche 2.3 La reproductibilité
 - Tâche 2.4 L'aide à la décision et à l'analyse des résultats
- Tâche 3 Développements informatiques
 - Tâche 3.1 : EQUER
 - Tâche 3.2 : ELODIE
- Tâche 4 Expérimentation et retour d'expérience
 - Tâche 4.1 Expérimentation interne : reproductibilité
 - Tâche 4.2 Expérimentation externe : satisfaction des utilisateurs
- Tâche 5 Diffusion et communication

Figure 4 : Tâches du projet BENEFIS (3)

2.3 Les outils utilisés

2.3.1 Les bases de données environnementales

Des bases de données environnementales permettent de regrouper, pour de nombreux produits, l'inventaire des flux de substances et des indicateurs environnementaux. Ainsi la réalisation des ACV est facilitée.

Deux d'entre elles sont utilisées dans la cadre de ce PFE.

Base de données Ecoinvent



La base de données environnementale Ecoinvent a été développée par le « Swiss Center for Life Cycle Inventories » de Lausanne (11). Elle répertorie plusieurs milliers de données sur des produits ou des procédés souvent utilisés dans les ACV et étant utilisable dans de nombreux domaines tels que l'agriculture, la chimie, l'énergie, le transport... Pour un produit donné, on distinguera les phases de production (fabrication, transport, chantier) et de fin de vie.

Les informations sont rassemblées sous forme de données d'inventaires et d'indicateurs d'impacts environnementaux, calculés suivant différentes méthodes.

Cette base de données est très flexible ; dû fait que les fiches Ecoinvent soient établies pour des produits ou des procédés élémentaires, l'utilisateur peut composer lui-même les produits finis dont il a besoin pour l'étude environnementale. Il est donc possible, en combinant des données dans des proportions choisies de décrire de nombreux produits.

La durée de vie du matériau est à renseigner par l'utilisateur puisque les fiches Ecoinvent traitent soit des impacts liés à la fabrication soit de ceux liés à l'élimination des produits.

L'accès au contenu de cette base de données est payant.

Base de données INIES, les FDES



INIES est la base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction (12). 1355 Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES) fournies par des fabricants ou des syndicats de professionnels sont disponibles gratuitement en ligne sur le site de l'INIES.

Les FDES respectent la norme AFNOR NF P01 010 relative à qualité environnementale des produits de construction et à la déclaration environnementale à sanitaire des produits de construction. Cette norme, valable jusqu'au 30 juin 2014, est remplacée par la norme NF EN 15804/CN.

A la différence des fiches de la base de données Ecoinvent, les fiches FDES sont établies pour des produits complets du secteur du bâtiment uniquement et sur tout leur cycle de vie. Les phases prises en compte sont décrites dans la norme, elles concernent la production, le transport, la mise en œuvre, la vie en œuvre et la fin de vie (par défaut, la mise en décharge). Aucune donnée concernant des procédés n'est incluse dans cette base. 17 indicateurs environnementaux sont calculés dans les FDES.

2.3.2 Les logiciels

Pour ce projet, la suite logicielle composée d'Alcyone, Pléiades+COMFIE et novaEquer est utilisée. Les résultats de COMFIE en termes de besoins peuvent être utilisés dans la suite logicielle composée d'eveBIM et d'Elodie. La Figure 5 illustre les interactions entre logiciels, ceux qui ont été utilisés sont ensuite présentés dans les paragraphes suivants.

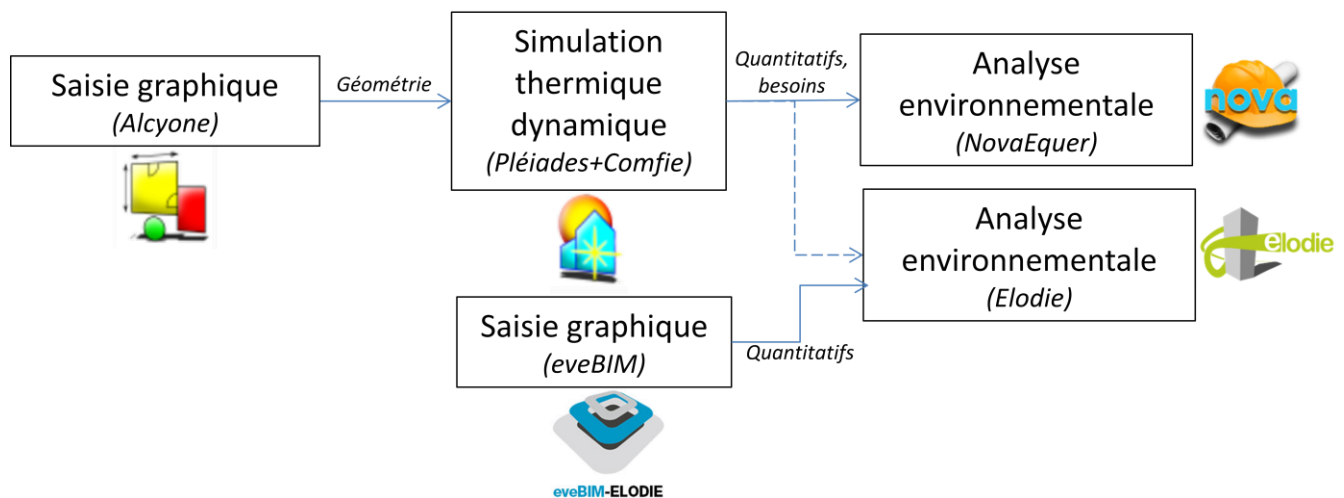


Figure 5 : Suites logicielles

Pléiades + COMFIE



Pléiades + COMFIE est un logiciel de simulation thermique dynamique dont le cœur de calcul COMFIE a été développé au centre d'énergétique de l'école des Mines de Paris par Bruno Peuportier et Isabelle Blanc-Sommereux. Pléiades + COMFIE est commercialisé par la société Izuba Energies depuis 2001. Ce logiciel est distribué essentiellement en France et est utilisé en phase projet afin d'optimiser l'efficacité énergétique du bâtiment étudié.

Il propose un modèle multi-zonal : le bâtiment modélisé à partir du logiciel Alcyone ou saisi directement dans Pléiades est divisé en zones thermiques dans lesquelles sont calculées divers indicateurs liés au confort thermique.

Le cœur de calcul COMFIE (Calcul d'Ouvrages Multizones Fixé à une Interface Experte) (13), programmé en langage Pascal sous l'environnement Delphi, est en constante évolution et le code se compose actuellement de plusieurs centaines de milliers de lignes. Le calcul se base sur la discrétisation des objets définissant le bâtiment en volumes finis sur lesquels un bilan thermique est effectué.

Equer et novaEquer



Equer est un outil d'aide à la décision permettant d'évaluer la qualité environnementale des bâtiments. Il a été développé dès 1995 au centre d'énergétique de l'école des Mines de Paris par Bruno Peuportier et Bernd Polster et est commercialisé par la société Izuba Energies.

NovaEquer, l'évolution d'Equer, n'est pas encore commercialisé. Actuellement en développement au CES cet outil permet de réaliser des ACV plus détaillées notamment en

ce qui concerne les mix électriques, la réalisation possible d'ACV à l'échelle d'un quartier ... D'autre part, l'interface utilisateur a été améliorée.

L'outil novaEquer fait partie de la suite logicielle de Pléiades + COMFIE. Pour réaliser l'ACV d'un bâtiment sous novaEquer, il faut d'abord l'avoir modélisé et avoir réalisé sa simulation thermique dynamique avec Pléiades + COMFIE. NovaEquer importe alors depuis Pléiades les quantitatifs des matériaux utiles pour la construction du bâtiment ainsi que les besoins de chauffage, besoin d'ECS, production photovoltaïque... qui seront utilisés pour le calcul de la performance environnementale.

D'autres informations sont ensuite à remplir directement dans novaEquer : la correspondance entre matériaux Pléiades et matériaux de la base de données novaEquer, des compléments d'informations sur le bâtiment, des données sur l'origine des énergies, la gestion de l'eau, des déchets mais aussi des données sur les transports quotidiens des occupants. Il n'est pas obligatoire de renseigner toutes ces rubriques; tout dépend des limites qui ont été choisies pour l'étude. En effet, si plusieurs bâtiments sont comparés, le site de construction étant déjà choisi, il n'est pas nécessaire d'inclure les transports (par exemple entre domicile et travail) puisque les résultats pour ce thème seront les mêmes dans toutes les variantes.

Pour quantifier les impacts environnementaux, douze indicateurs sont retenus dans Equer, ils sont présentés dans la Figure 6.

Indicateur	Unité	Remarque
GWP, Effet de serre	[kg équivalent dioxyde de carbone CO ₂]	Potentiel de réchauffement des gaz à effet de serre sur une période de 100ans.
Acidification	[kg équivalent de dioxyde de soufre SO ₂]	Contribution aux pluies acides et au dépérissement des forêts
Eutrophisation	[kg équivalent de phosphate PO ₄ ³⁻]	Apport de substances jouant le rôle d'engrais dans les eaux de surface
Production d'ozone photochimique	[kg équivalent d'éthylène C ₂ H ₄]	Formation d'ozone dans les couches basses de l'atmosphère lié à la décomposition de composés organiques volatiles
Domage à la biodiversité	[PDF.m ² .an] (Potentially Disappeared Fraction)	Concerne l'atteinte à la biodiversité. Cet indicateur s'exprime en pourcentage d'espèces disparues par m ² et par an.
Odeurs	[m ³ d'air malodorant équivalent à 1kg/m ³ d'ammoniac]	Correspond à un niveau de concentration d'une odeur tel que 50% des individus détectent cette odeur.
Domage à la santé	[DALY] (Disability Adjusted Life Years)	Concerne l'impact sur la santé humaine. Cet indicateur s'exprime en années de vie en bonne santé perdues.
Epuisement des ressources abiotiques	[kg équivalent d'antimoine Sb]	Concerne l'appauvrissement des ressources pouvant devenir insuffisantes dans les 100ans à venir.
Demande cumulative d'énergie	[MJ]	Concerne la quantité d'énergie primaire consommée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.
Consommation d'eau	[m ³ d'eau puisée]	Eau consommée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.
Déchets	[tonne équivalent de déchets ultimes]	Trois catégories de déchets existent : inertes, dangereux et non dangereux. Un coefficient permet d'adapter la quantité de déchets en fonction de la catégorie.

Indicateur	Unité	Remarque
Déchets radioactifs	[dm3 de déchets]	Quantité de déchets radioactifs produits sur le cycle de vie du bâtiment.

Figure 6 : Indicateurs environnementaux de novaEquer

Les méthodes de calcul de ces indicateurs sont présentées en annexe.

Les résultats d'ACV dans novaEquer sont donc les 12 indicateurs. Ils sont calculés pour les quatre phases de la vie du bâtiment : la construction, l'utilisation, la rénovation et la démolition.

NovaEquer utilise pour le calcul des impacts liés à la fabrication des matériaux et composants de construction la base de données suisse Ecoinvent. Plus de 360 fiches Ecoinvent rassemblant les principaux matériaux et procédés nécessaires à l'ACV des bâtiments ont été transposées dans novaEquer. Des modifications peuvent être apportées aux données Ecoinvent :

- Des **conversions** sont réalisées dans le cas où les unités proposées par Ecoinvent ne correspondent pas à celles utilisées dans novaEquer.
- Des **compositions** de différents matériaux sont effectuées afin d'obtenir un produit complet. Par exemple utilisation de bois et de verre pour faire une fenêtre.
- Des **contextualisations** permettent de passer du mix électrique où le produit est supposé être fabriqué (souvent la suisse) à un mix électrique européen ou français (en fonction du lieu d'où proviennent les matériaux de fabrication utilisés en France).
- Les données peuvent aussi être modifiées pour prendre en compte le **carbone biogénique**. Il s'agit du CO2 captés par les végétaux lors de leur croissance et rejeté dans l'atmosphère lors de combustion.

Au cours de ce stage, une contribution a été apportée à la mise à jour de la base de données utilisée dans NovaEquer (passage de la version 2.2 à la version 3.0 d'Ecoinvent). Les tâches réalisées pour cette mise à jour sont présentées en annexe.

Elodie



Elodie est un outil permettant de mesurer l'impact global des bâtiments sur l'environnement. Il a été développé depuis 2008 par le Centre Scientifique et Technique des Bâtiment. Cet outil peut aussi être utilisé comme outil d'aide à la décision.

Elodie utilise les fiches FDES de la base INIES pour le calcul des impacts environnementaux du bâtiment. Des données Elodie, renseignées par le CSTB peuvent aussi être utilisées. C'est notamment le cas pour les équipements car la base de données INIES n'inclut que des matériaux de construction (pas d'impacts pour les équipements ou les vecteurs énergétiques). Dans ce cas, les données sont généralement issues de la base suisse Ecoinvent et subissent un post-traitement pour prendre en compte, pour chaque matériau, énergie ou équipement, l'ensemble du cycle de vie.

Pour la réalisation d'une ACV dans Elodie, le projet est décomposé en îlots puis en bâtiments. Dans chaque bâtiment six contributeurs sont à remplir (14). Ils correspondent à différentes origines d'impacts environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment.

- Contributeur composant : matériaux de construction et équipements
- Contributeur énergie : consommation d'énergie en phase utilisation
- Contributeur eau : consommation d'eau en phase utilisation
- Contributeur déplacement : trajets des occupants
- Contributeur chantier : impacts liés à la construction non pris en compte dans les FDES
- Contributeur déchets : production de déchets en phase utilisation

Les quantitatifs de matériaux utilisés dans le bâtiment étudié sont à entrer manuellement dans le contributeur composant d'Elodie. Il faut ensuite leur attribuer une FDES.

Une autre méthode consiste à utiliser l'outil EveBim qui permet de modéliser en 3D le bâtiment. Chaque paroi créée dans EveBim doit être décrite : il faut préciser s'il s'agit d'une cloison, d'une toiture... et il est possible d'attribuer la FDES directement dans cet outil. Les quantitatifs de matériaux et, le cas échéant, les FDES sont alors directement transmis à Elodie.

Pour le contributeur énergie, les données doivent être également entrées manuellement après avoir réalisé une simulation thermique dynamique du bâtiment dans un autre logiciel.

Pour quantifier les impacts environnementaux, 17 indicateurs sont déterminés dans les FDES. Cependant, seuls 9 d'entre eux sont exploitables par tous les contributeurs d'Elodie ; ils sont présentés dans la Figure 7.

Indicateur	Unité	Remarque
Changement climatique	[kg équivalent dioxyde de carbone CO ₂]	Potentiel de réchauffement des gaz à effet de serre sur une période de 100 ans.
Acidification atmosphérique	[kg équivalent de dioxyde de soufre SO ₂]	Contribution aux pluies acides et au dépérissement des forêts
Formation d'ozone photochimique	[kg équivalent d'éthylène C ₂ H ₄]	Formation d'ozone dans les basses couches de l'atmosphère liée à la décomposition de composés organiques volatiles
Consommation de ressources énergétiques – énergie primaire totale	[kWh]	Concerne la quantité d'énergie primaire consommée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.
Consommation de ressources énergétiques – énergie non renouvelable	[kWh]	Ne concerne que la part d'énergie primaire consommée pour le cycle de vie du bâtiment qui est issue d'énergie non renouvelable.
Consommation d'eau	[L]	Eau consommée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.
Déchets dangereux éliminés	[kg]	Quantité de déchets dangereux produits sur le cycle de vie du bâtiment.
Déchets non dangereux	[kg]	Quantité de déchets non dangereux produits sur le cycle de vie du bâtiment.
Déchets radioactifs éliminés	[kg]	Quantité de déchets radioactifs produits sur le cycle de vie du bâtiment.

Figure 7 : Indicateurs environnementaux d'Elodie

Les méthodes de calcul pour ces indicateurs sont définies dans la norme NF P01-010 (valide jusqu'au 30 juin 2014) et dans la norme NF EN 15804/CN (qui remplace la NF P01-010 ; les industriels disposent de 5 ans pour mettre à jour leurs FDES et respecter la nouvelle norme). Elles sont détaillées en annexe.

Ces neuf indicateurs peuvent être donnés pour un matériau, pour un contributeur, pour un bâtiment, pour un flot ou encore pour l'ensemble du projet.

3 Simulation thermique dynamique des maisons INCAS

La simulation thermique dynamique (STD) des bâtiments, réalisée ici avec Pléiades + COMFIE constitue la **première étape de l'évaluation environnementale**. L'objectif de la STD est de **déterminer les consommations énergétiques** des bâtiments. Or il est nécessaire de bien les connaître pour calculer, lors de l'ACV, les indicateurs environnementaux pour la phase d'utilisation du bâtiment.

D'autre part, une modélisation précise des bâtiments est réalisée avant d'entreprendre leurs STD et les quantités de matériaux pour chaque constituant sont transmises directement de Pléiades + COMFIE vers novaEquer. Cela facilite la description des maisons dans cet outil d'ACV.

3.1 Présentation des maisons passives de la plateforme INCAS

L'étude de la reproductibilité des outils d'analyse de cycle de vie est effectuée sur les **maisons passives de la plateforme INCAS** situé sur le site de l'INES (Institut National de l'Energie Solaire). Ces maisons ont été construites par l'INES et par le CEA (Commissariat à l'énergie Atomique) au Bourget du Lac. La Figure 8 permet de visualiser la plateforme. L'ensemble des données relatives à ces maisons est issu d'un rapport du projet ANR HABISOL (15) ainsi que d'informations fournies par le CEA.



Figure 8 : Photo des trois premières maisons construites sur la plateforme INCAS

Les performances visées correspondent au label allemand «PassivHaus» qui limite les besoins de chauffage à 15 kWh/m²/an, la consommation énergétique totale (chauffage, climatisation, ECS, auxiliaires et électricité domestique) à 120 kWh/m²/an et le débit d'infiltration d'air à 0,6 Vol/h. Pour cela, les choix architecturaux respectent les **principes de la construction bioclimatique**. Les maisons sont très compactes et sont exposées presque plein sud. Leurs enveloppes sont très performantes.

Les maisons expérimentales à haute performances énergétiques sont **entièrement instrumentées** pour permettre le test des techniques constructives et des systèmes énergétiques installés. Les occupants sont simulés par des résistances électriques et des générateurs d'humidité.

Actuellement, la plateforme INCAS est composée de quatre maisons de même géométrie pour faciliter leur comparaison. Les modes constructifs sont différents dans chaque maison comme le montre la Figure 9 en page 15.

Trois variantes constructives ont été étudiées : la maison « double mur », la maison en « béton banché » et celle à « ossature bois ».

En pratique, la maison I-OB, réalisée par un groupe allemand, a des dimensions légèrement différentes des maisons I-DM et I-BB., réalisée par des entreprises françaises. Or dans le but de comparer les matériaux de construction (et non l'influence des variations géométriques) lors de l'ACV, la **géométrie** des trois maisons a été **considérée comme strictement identique**.

Dénomination	Composition	Remarques
I-DM	Double Mur : deux couches de blocs creux en béton séparés par de la laine de verre	Inertie lourde 1 ^{ère} maison bâtie
I-BB	Béton Banché : enveloppe en béton et isolation par l'extérieur avec du polystyrène extrudé	Inertie lourde 2 ^{nde} maison bâtie
I-OB	Ossature Bois et laine de bois pour l'isolation	Inertie légère 3 ^{ème} maison bâtie
I-MA	Briques Monomur	Inertie lourde 4 ^{ème} maison bâtie

Figure 9 : Composition des murs des maisons INCAS

3.2 Hypothèses retenues pour la simulation thermique dynamique

La simulation thermique dynamique des bâtiments a été réalisée à partir du logiciel Pléiades + COMFIE. Des fichiers Pléiades modélisant les maisons existaient déjà puisque les maisons INCAS ont fait l'objet de nombreuses études. Les hypothèses prises dans ces fichiers ont été modifiées pour mieux correspondre aux informations fournies par le CEA et des scénarios de fonctionnement correspondant à ceux décrits dans la réglementation thermique de 2012 (RT 2012) ont été choisis. D'autre part, des **choix de modélisation** ont été faits pour **faciliter la comparaison des bâtiments** du point de vue de l'ACV.

3.2.1 Description des bâtiments

Les bâtiments passifs étudiés sont des maisons individuelles de surface habitable (SHAB) d'environ 90 m² et de surface hors d'œuvre nette (SHON) d'environ 120 m². Ils sont composés d'un rez-de-chaussée, d'un étage, de combles et sont construites sur un vide sanitaire ; les plans sont donnés ci-après dans la Figure 10 :

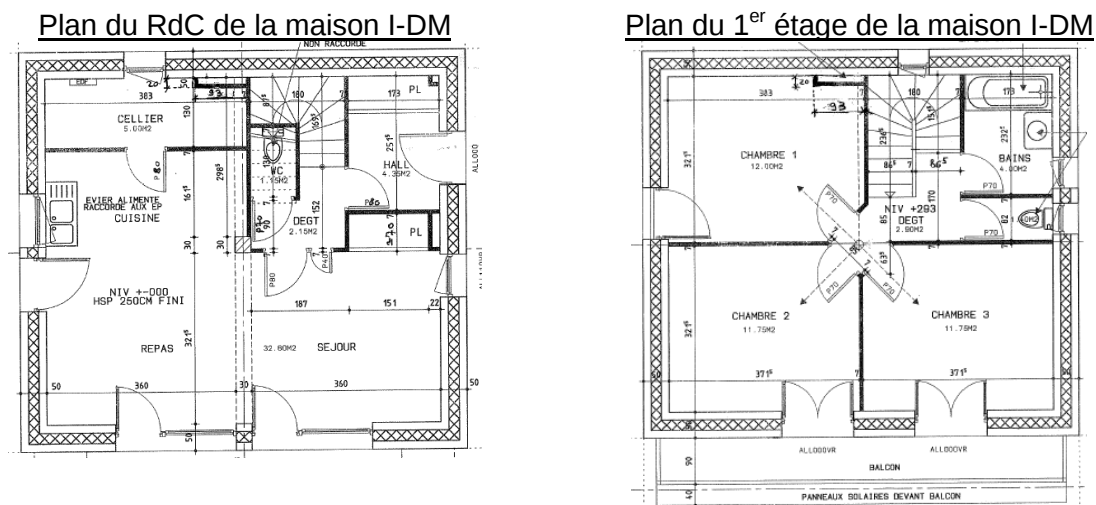


Figure 10 : Plan de la maison I-DM

Onze zones thermiques ont été modélisées, cela correspond approximativement à une zone par pièce plus une zone pour les combles et une autre pour le vide sanitaire.

Les abords de la maison sont considérés comme végétalisés, ce qui n'est pas encore le cas dans la réalité. Un albédo de 0,20 a été retenu.

3.2.2 Modélisation des maisons

Composition des parois

Les compositions des parois renseignées dans Pléiades ne correspondent pas à celles construites dans la réalité. En effet, les compositions réelles ont été modifiées et les

épaisseurs d'isolant ont été recalculées pour avoir dans les trois maisons des **résistances thermiques équivalentes au niveau des isolants** de chaque paroi : $R_{\text{isolant_BB}} = R_{\text{isolant_DM}} = R_{\text{isolant_OB}}$. Pour ce faire, la maison I-BB a été prise comme référence. Ainsi, seuls les matériaux sont comparés pour l'ACV, toutes choses égales par ailleurs. La composition des parois pour chaque maison est précisée en annexe.

Menuiseries

Les menuiseries ont été **considérées comme identiques** dans les trois maisons pour que la comparaison de l'ACV des maisons se fasse sur le type de matériau utilisé et non sur la géométrie des maisons. En réalité, les menuiseries de la maison I-OB, construite par une entreprise différente, diffèrent légèrement.

Ponts thermiques

Dans le cadre d'une thèse réalisée au CES par Fabio Munaretto (16), les ponts thermiques de la maison I-BB ont été calculés très précisément en utilisant le logiciel TRISCO. Une première série de calculs avait été réalisée en calculant les ponts au niveau du nu intérieur du bâtiment. Dans une seconde série de calcul, la convention mi-béton avait été utilisée pour le calcul des ponts. C'est ce second mode de calcul qui avait été retenu pour l'étude puisqu'il permet de mieux prendre en compte l'inertie. La différence entre les conventions mi béton et nu intérieur est présentée en Figure 11.

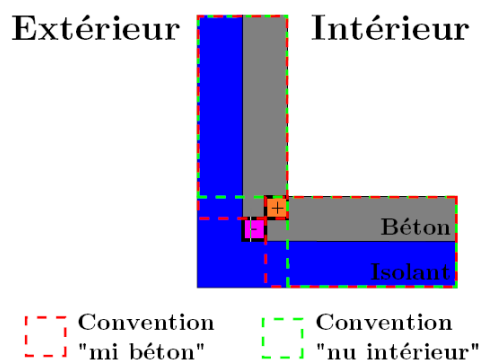


Figure 11 : Conventions mi béton et nu-intérieur [Munaretto, 2014] (16)

Pour les deux autres maisons, les **ponts thermiques** n'étaient pas connus. Le logiciel TRISCO n'étant plus disponible, les valeurs données dans le fascicule 5 des **règles de calcul Th-U de la RT 2012** (17) ont été utilisées.

Pour plus de cohérence, les ponts thermiques de la maison I-BB ont été modifiés et sélectionnés dans la RT également. Ces ponts RT étant déterminés au niveau du nu intérieur, et non à la moitié de l'épaisseur du béton comme défini avant, les surfaces des pièces ont été réajustées. Une comparaison a pu être réalisée entre ponts thermiques déterminés par la méthode RT et ponts thermiques calculés avec TRISCO.

Les caractéristiques géométriques des ponts thermiques pour chacune des maisons INCAS sont bien connues grâce aux informations fournies par le CEA. Cependant, les maisons sont très performantes énergétiquement et possèdent de nombreux rupteurs de ponts thermiques qui ne sont pas décrits dans les règles Th-U. Le choix s'est donc porté sur **des configurations de ponts thermiques** se rapprochant le plus possible de la géométrie réelle mais ces **approximations** tendent à faire fortement **augmenter les besoins de chauffage**, et pénalisent la maison I-OB.

Les écarts entre les valeurs de ponts pour les différentes variantes constructives étaient très importants, notamment pour le pont thermique au niveau du plancher bas. Pour harmoniser les valeurs et ne pas trop défavoriser une variante constructive, il a été décidé de choisir la même valeur de pont thermique dans les trois maisons pour le plancher bas.

Les ponts thermiques finalement retenus sont récapitulés ci-après dans la Figure 12 en page 17.

	I-BB RT	I-BB TRISCO	I-DM RT	I-OB RT
	ψ [W/(m.K)]	ψ [W/(m.K)]	ψ [W/(m.K)]	ψ [W/(m.K)]
Angle Sortant	0,11	0,0559	0,11	0,18
Plancher Bas	0,47	0,1226	0,47	0,47
Plancher Haut	0,06	0,0396	0,05	0,09
Plancher Intermédiaire	0,09	0,0642	0,09	0,15
Seuil Porte Rdj	0,79	0,45027	0,79	0,7
Seuil Porte R+1	0,41	0,498	0,41	0,35
Appui Menuiserie	0,36	0,36	0,25	0,24
Linteau Menuiserie	0,04	0,04	0,05	0,1
Tableau Menuiserie	0,04	0,04	0,03	0,1

Figure 12 : Valeurs des ponts thermiques

3.2.3 Scénarios de fonctionnement

Les scénarios de fonctionnements retenus correspondent à des scénarios de fonctionnement réglementaire issus des règles de calculs de la méthode Th-BCE (18). (Cela a permis une comparaison entre les résultats des modules STD et RT de Pléiades ; les résultats de cette étude ne concernant pas l'ACV, ils n'ont pas été présentés ici).

Chauffage

La consigne de température est de 19°C lorsque les occupants sont présents. Elle passe à 16°C lors d'une inoccupation de moins de 48h (absences des occupants en journée) et à 7°C lors d'une inoccupation de plus de 48h (lors des trois semaines de vacances : les deux premières semaines d'août et la dernière semaine de décembre).

Occupation

On considère dans les maisons INCAS une occupation par 1,9 adultes équivalent. Le calcul permettant d'aboutir au nombre d'adulte équivalent, et qui dépend de la surface habitable, est présenté en annexe. Les occupants sont absents en journée, sauf le mercredi après-midi et les week-ends. Ils sont également absents lors des semaines de vacances.

Puissance dissipée

En l'absence des occupants et la nuit, la puissance dissipée est de 1,14 W/m². Au cours des vacances, aucune puissance n'est dissipée. Le reste du temps, la puissance dissipée est de 5,70 W/m².

Eclairage

D'après la méthode RT, l'éclairage est adapté heure par heure en fonction de l'éclairement. Cette prise en compte heure par heure ne pouvant être réalisée dans Pléiades, le scénario de puissance dissipée a été ajusté. Une puissance dissipée de 1,4 W/m² pour l'éclairage a été ajoutée au scénario de puissance dissipée. L'éclairage est utilisé de 7h à 9h et de 19h à 22h, c'est à dire aux heures où la lumière naturelle n'est généralement pas suffisante.

Ventilations et infiltrations

Pléiades + COMFIE permet de prendre en compte des scénarios de ventilations : externe, interne, de surventilation et d'infiltration.

Les débits choisis pour la ventilation sont ceux décrits dans [Munaretto, 2014] (16), d'après les données fournies par le CEA. La Figure 13 page 18 permet de visualiser tous les scénarios.

Les flèches bleues représentent les amenées d'air ; les flèches rouges les extractions d'air ; les flèches violettes les flux d'air interne et les flèches bordeaux les exfiltrations.

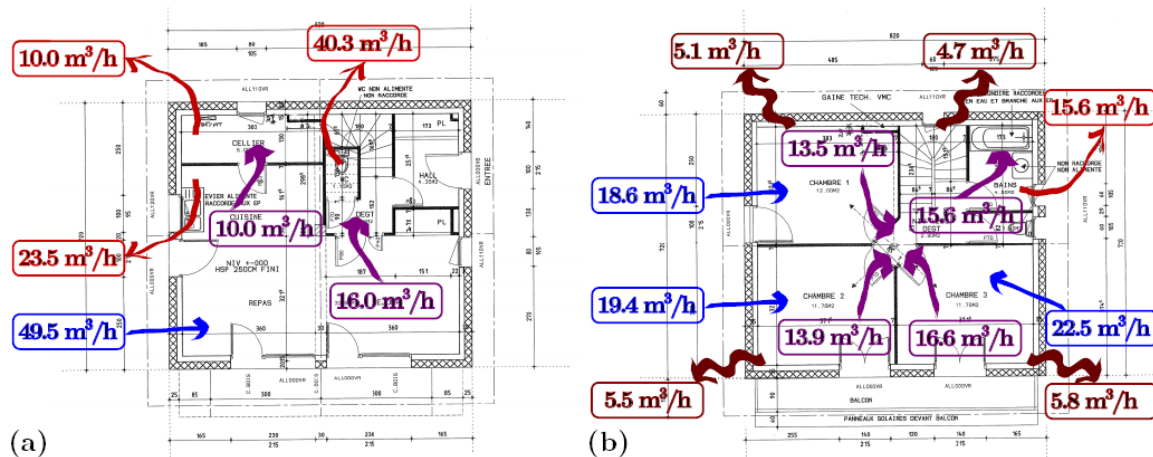


Figure 13 : Débits de ventilation de base [Munaretto, 2014] (16)

Pour la ventilation externe, on considère une ventilation mécanique contrôlée à double flux avec un échangeur de chaleur d'efficacité 90%, bipassé en période estivale. Le débit d'air entrant modélisé correspond à une moyenne des débits de base et de pointe pondérée par le temps. Les débits de pointe et de base ont également été repris dans [Munaretto, 2014] et valent $110 \text{ m}^3/\text{h}$ pour la base et $160 \text{ m}^3/\text{h}$ pour la pointe (utilisée 7h par semaine).

Aucun scénario d'infiltration n'est pris en compte dans les simulations. En effet, le débit d'air soufflé est de $110 \text{ m}^3/\text{h}$ et le débit d'air extrait est de $90 \text{ m}^3/\text{h}$; il n'y a donc pas d'infiltrations mais des exfiltrations.

Pour les flux d'air internes, des ventilations internes, modélisées par des portes ouvertes, ont été mises en place. Les débits de ventilation interne de [Munaretto, 2014], présentés en Figure 13 ne pouvaient pas être utilisés ici puisqu'ils ont été calculés dans des conditions de fonctionnement particulières et en régime stationnaire.

Le scénario de ventilation externe correspond à une ouverture des fenêtres lorsqu'il fait plus de 27°C dans une zone. Les fenêtres sont refermées lorsque la température de la zone repasse en dessous de 24°C . Le débit de surventilation a été fixé à 15 Vol/h .

Occultation

Conformément aux données fournies par le CEA, on considère des protections mobiles de type volets roulants sur toutes les fenêtres. Le pourcentage d'occultation considéré vaut 10% en hiver, 40% l'été et 80% en période de vacances.

Refroidissement

Aucun scénario de refroidissement n'a été envisagé. En effet, pour qu'un bâtiment d'habitation puisse utiliser un système de refroidissement d'après la RT 2012, il doit à la fois avoir une classe d'exposition au bruit BR2 ou BR3 et être situé dans les zones climatiques H2d ou H3 à moins 400 m d'altitude. Les maisons INCAS étant situées en zone H1c, elles ne peuvent donc pas utiliser de systèmes de rafraîchissement actif.

Régulation

Conformément aux données du CEA, la régulation est de type chauffage central ; les températures des pièces chauffées sont régulées en fonction de la température du salon.

3.2.4 Données météorologiques

Plusieurs fichiers météo, disponibles dans Pléiades, peuvent être utilisés pour la simulation ; ils correspondent à plusieurs stations météo et méthodologies. Il est aussi possible d'utiliser

le fichier météo correspondant aux relevés météorologiques de l'année 2013 sur le site de l'INES. Ce dernier fichier météo a été créé dans Pléiades grâce à Météocalc à partir des mesures au pas de temps horaire de nombreux capteurs de rayonnement et de température disposés sur site.

Avant de pouvoir utiliser ces données, il a fallu dans un premier temps vérifier leur cohérence. En effet, les relevés météo des années précédentes s'étaient révélés peu fiables. Certaines valeurs ont également été modifiées en raison du dysfonctionnement de certains pyranomètres¹ par moment.

Démarche utilisée pour tester la cohérence des mesures et corriger les valeurs des rayonnements solaires mesurés

Dans un premier temps les dysfonctionnements du capteur de rayonnement global horizontal ont été corrigés. Les valeurs de rayonnements négatives ont été mises à 0 si elles apparaissaient la nuit. Si des valeurs de rayonnements négatives apparaissent en journée, une interpolation a été réalisée pour déterminer les données manquantes.

Ensuite, la cohérence des données mesurées a été vérifiée. Pour cela, les valeurs du rayonnement global incliné à 30° obtenues par mesures sur site ont été comparées avec celles calculées de deux manières différentes à partir du rayonnement global horizontal.

Pour la première méthode de calcul du rayonnement global incliné à 30°, seul le rayonnement global horizontal mesuré est une donnée d'entrée. Les rayonnements diffus et direct horizontaux sont obtenus par calcul en déterminant le rayonnement extraterrestre (19) et l'indice de clarté (kt). Il est ensuite possible d'aboutir au rayonnement global incliné à 30° en considérant un angle de 30° pour les rayonnements direct, diffus et réfléchi.

Pour la seconde méthode de calcul, les rayonnements global et diffus horizontal issus des mesures sont données en entrée. Le direct horizontal est obtenu par soustraction et le rayonnement global incliné à 30° se calcule en considérant un angle de 30° pour les rayonnements direct diffus et réfléchi.

La Figure 14 présente les résultats de la comparaison des méthodes pour une journée.

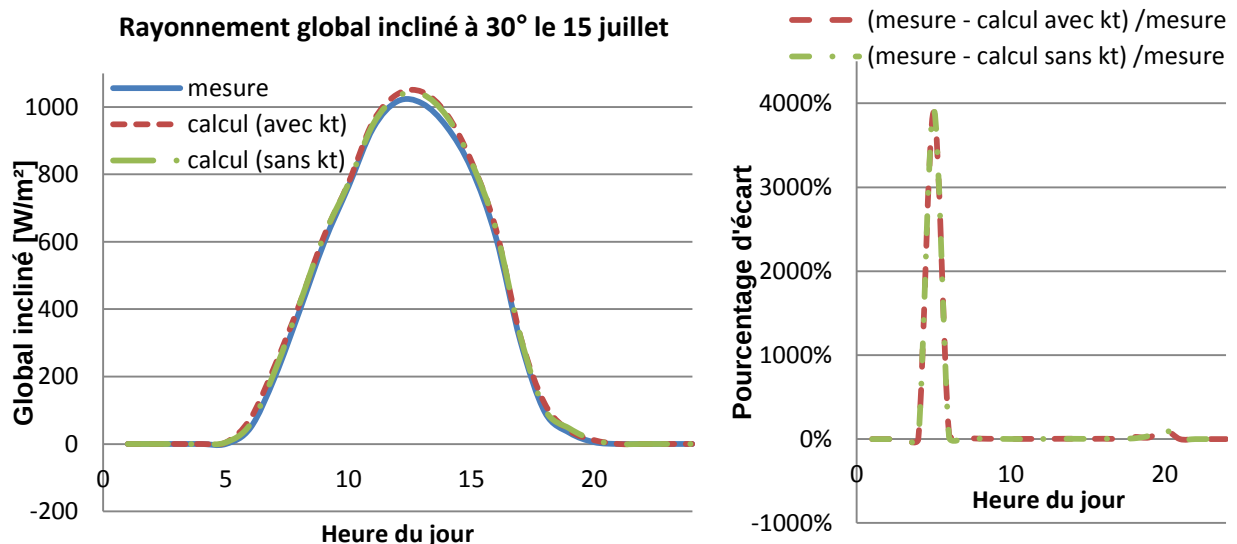


Figure 14 : Vérification de la cohérence des mesures à partir du rayonnement global incliné à 30°

¹ Pyranomètre : capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle. Il permet de mesurer la puissance du rayonnement solaire total en W/m².

Généralement, les trois courbes du global incliné à 30° représentant la mesure et les deux méthodes de calcul donnent des valeurs assez proches. D'autre part, les valeurs de rayonnement semblent cohérentes. Les données mesurées peuvent donc être validées. Cependant, à certains moments, les deux méthodes de calcul donnent des résultats assez différents. Cela se produit généralement lorsque le soleil est bas dans le ciel (en hiver et en début et fin de journée l'été). Il est alors préférable d'utiliser la seconde méthode qui utilise le rayonnement diffus horizontal issu des mesures.

Le capteur de rayonnement diffus horizontal présentant lui aussi des dysfonctionnements à certaines heures sur l'année, certaines données ont dû être corrigées.

Pour les données manquantes, il est possible de réaliser des interpolations. Une autre possibilité consiste à utiliser les valeurs du diffus horizontal calculées à partir du global horizontal en utilisant le rayonnement extraterrestre et l'indice de clarté (kt). C'est cette deuxième méthode qui a été retenue car les interpolations sont moins précises lorsque la panne du capteur dure longtemps.

Création du fichier météo dans Pléiades

Pour la réalisation du fichier météo dans Pléiades, les données suivantes ont été renseignées : date, température extérieure, rayonnement global horizontal mesuré corrigé, diffus horizontal mesuré et corrigé en utilisant la méthode du coefficient de clarté.

Afin de valider le fichier météo, les DJU ont été calculés à partir de Météocalc. On obtient pour le site de l'INES 2513 DJU sur l'ensemble de l'année 2013. D'après le site « infoclimat.fr », en 2013, 2822 DJU ont été observés à Chambéry. Cela se rapproche donc de la valeur estimée par Météocalc.

3.2.5 Équipements

De nombreux équipements ont été installés dans les maisons INCAS pour réaliser différents essais. Pour la STD et l'ACV, les équipements suivants ont été retenus :

- Le chauffage se fait par l'air : une VMC double flux incluant une résistance électrique est utilisée à cet effet.
- L'eau chaude sanitaire est fournie par des panneaux solaires thermiques installés sur le balcon. L'appoint est réalisé dans le ballon solaire par une résistance électrique.
- Des panneaux photovoltaïques sont installés en toiture.

Production d'eau chaude sanitaire (ECS)

Concernant la production d'ECS, le système retenu pour l'étude correspond à celui installé sur la maison I-DM qui est équipée de 4 m² de **panneaux solaires thermiques** plans vitrés, installés au niveau du balcon. Le ballon de 300 l du chauffe-eau solaire individuel (CESI) est à appoint électrique intégré.

Le scénario de puisage utilisé pour l'étude correspond à celui de la RT 2012. Il prévoit une occupation de 1,9 adultes équivalents (arrondi à deux personnes dans la simulation), consommant 64 l/jour/personne à 40°C. Les calculs permettant d'aboutir au volume d'eau puisé sont en annexe.

L'outil Solo2000 du CSTB a été utilisé afin de valider le dimensionnement du CESI après la détermination des volumes d'eau puisés. Il s'est avéré que l'installation était surdimensionnée. Le taux de couverture solaire était supérieur à 90% presque toute l'année, ce qui implique que l'installation devait être très fréquemment en stagnation. D'autre part, la productivité était très faible avec seulement 201 kWh/(m².an).

L'installation a été redimensionnée pour éviter ces problèmes de stagnation. Avec 3 m² de panneaux solaires et un ballon de 200 l, les performances de l'installation sont nettement améliorées : le taux de couverture annuel passe à 73% et la productivité augmente pour atteindre une valeur de 412 kWh/(m².an).

L'évaluation de la consommation et de la production énergétique du CESI peut être réalisée de trois façons différentes avec Pléiades : en utilisant un composant en développement de modélisation de CESI ou en décrivant le type de système utilisé pour la production et le puisage d'eau chaude sanitaire dans les modules STD ou RT (partie calcul réglementaire de Pléiades). L'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes conduit à des écarts importants au niveau de la consommation et du taux de couverture solaire comme le montre la Figure 15.

	Composant en développement	Description des systèmes, module STD	Description des systèmes, module RT
Consommation	402 kWh/an	766 kWh/an	930 kWh/an
Taux de couverture solaire	73%	61%*	55%*

*taux de couverture solaire déterminé en faisant la même simulation avec 0 m² de capteur solaire

Figure 15 : Consommation énergétique donnée par les trois méthodes

Les valeurs de consommation finalement choisies correspondent à celles obtenues en décrivant le CESI en STD. En effet, cette méthode donne des résultats intermédiaires et cet outil est le seul disponible par le CSTB, l'un des partenaires du projet BENEFIG.

Production locale d'électricité

Différents systèmes photovoltaïques sont testés sur les maisons INCAS. Le champ de panneaux retenu pour l'étude est celui présent sur la maison I-DM. Il se compose de **39,3 m²** de **panneaux photovoltaïques** (PV) en silicium polycristallin installés en toiture de puissance nominale **5 kWc**. L'installation est en surimposition.

Les informations concernant ce champ et notamment les caractéristiques des modules et de l'onduleur sont issues du document du CEA (15).

Ces éléments sont saisis dans le composant « Panneaux photovoltaïque » de Pléiades + COMFIE.

Il faut noter que les installations photovoltaïques en maisons individuelles dépassent rarement une puissance crête de 3 kWc. Le dimensionnement n'a cependant pas été modifié car on peut supposer que la taille des installations photovoltaïques augmentera dans les maisons à énergie positive.

En lançant la simulation, COMFIE calcule heure par heure la production électrique des panneaux, de l'onduleur. Lorsque toutes consommations d'électricité sont connues, il est possible de déterminer la part autoconsommée et la part appelée sur le réseau.

3.3 Résultats des simulations thermiques dynamiques

Toutes les simulations sont réalisées pour la géométrie et les scénarios de fonctionnement décrits ci-avant. La durée de simulation est de 1 an et le pas de temps choisi est de 1/2h. La période de mise en température est de deux semaines.

3.3.1 Les besoins de chauffage

Le choix du fichier météo ou de l'origine des ponts thermiques influencent particulièrement les résultats. Les besoins de chauffage sont présentés en Figure 16 (page 22) et Figure 17 (page 23) en faisant varier ces deux paramètres.

Influence du choix du fichier météo

NB : Pour cette série de simulation, les ponts thermiques choisis sont ceux issus de la RT2012.

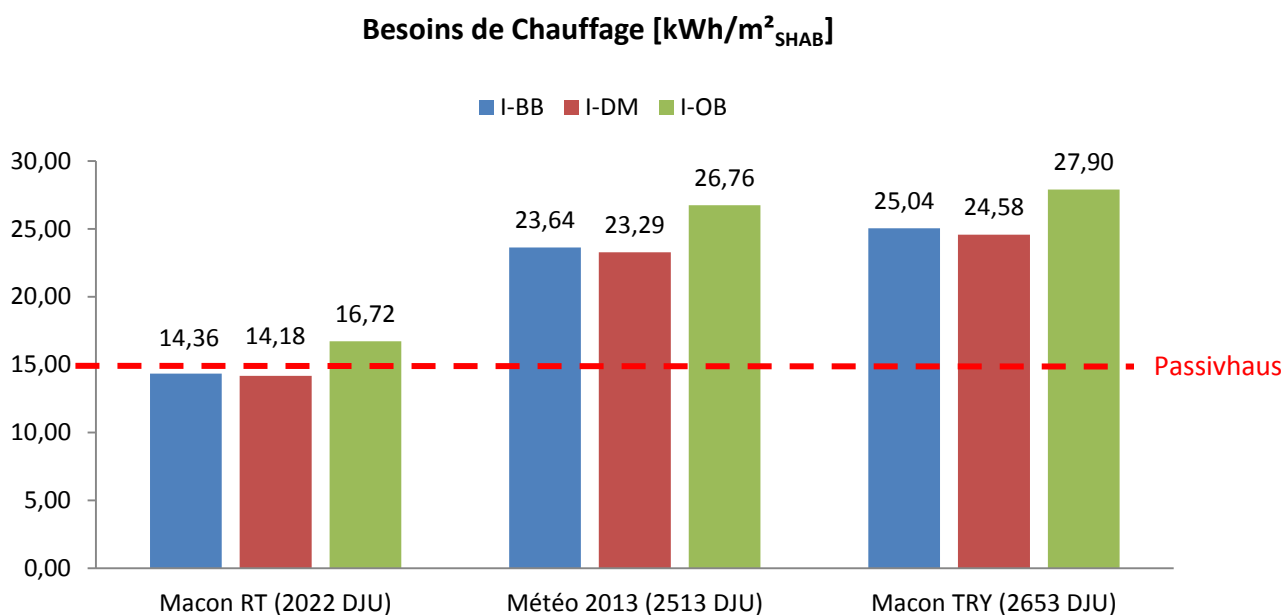


Figure 16 : Besoins de chauffage pour les trois variantes constructives et différents fichiers météo

En fonction des stations météorologiques choisies les besoins de chauffage varient de manière significative. L'écart relatif entre « Macon RT » et « Macon TRY », en prenant Macon RT comme référence, est de plus de 65%. De ce fait, en fonction du fichier météo choisi, le label Passivhaus visé par les maisons INCAS n'est pas forcément respecté.

Il est à noter que les trois fichiers météo n'ont pas été créés à partir des mêmes données.

- Macon RT correspond au fichier météo utilisé dans la RT 2012. Ce fichier pour une année type a été créé à partir de données mesurées par Météo France sur la période de janvier 1994 à décembre 2008 ayant subi un post traitement.
- Météo 2013 correspond au fichier météo réalisé au cours de ce stage. Il est issu de mesures réalisées sur le site de l'INES.
- Macon TRY : ce fichier météo a été réalisé à partir de données collectées entre 1980 et 1990 dans le cadre d'un programme européen.

Les DJU pour le fichier météorologique Macon RT 2012 semblent un peu faibles. Cependant c'est ce fichier météo qui a été retenu pour la suite de l'étude. De cette manière toutes les hypothèses de modélisation sont conformes à la réglementation thermique de 2012.

Dans tous les cas, la maison à ossature bois est celle pour laquelle les besoins de chauffage sont les plus importants bien que les résistances thermiques pour les trois maisons soient équivalentes au niveau de l'isolant. Cela s'explique en grande partie par l'incertitude sur le choix des ponts thermiques dans la RT qui a conduit à une surévaluation de ceux-ci, c'est ce qu'on peut observer dans la rubrique suivante. De même la maison I-DM a des besoins de chauffage plus faibles que la maison I-BB, bien que son inertie soit légèrement plus faible. Cela est dû aux valeurs de ponts thermiques choisis dans la RT, plus faibles pour I-DM que pour I-BB pour certaines configurations, comme le montre la Figure 12 (en page 17).

Influence du choix des ponts thermiques

NB : Pour cette série de simulation, le fichier météo choisi est celui issu de la RT (Macon RT 2012).

Les graphiques suivants présentent les besoins de chauffage pour différentes variantes de ponts thermiques.

Le graphique de gauche permet de visualiser les besoins de chauffage des maisons I-BB et I-OB avec les ponts thermiques de la maison I-BB choisis dans la RT. Cela revient à comparer les performances des maisons indépendamment du choix des ponts thermiques.

Le graphique de droite montre les besoins de chauffage pour la maison I-BB pour trois configurations : ponts thermiques choisis dans la RT et ponts thermiques calculés avec le logiciel TRISCO pour les conventions nu-intérieur et mi-béton.

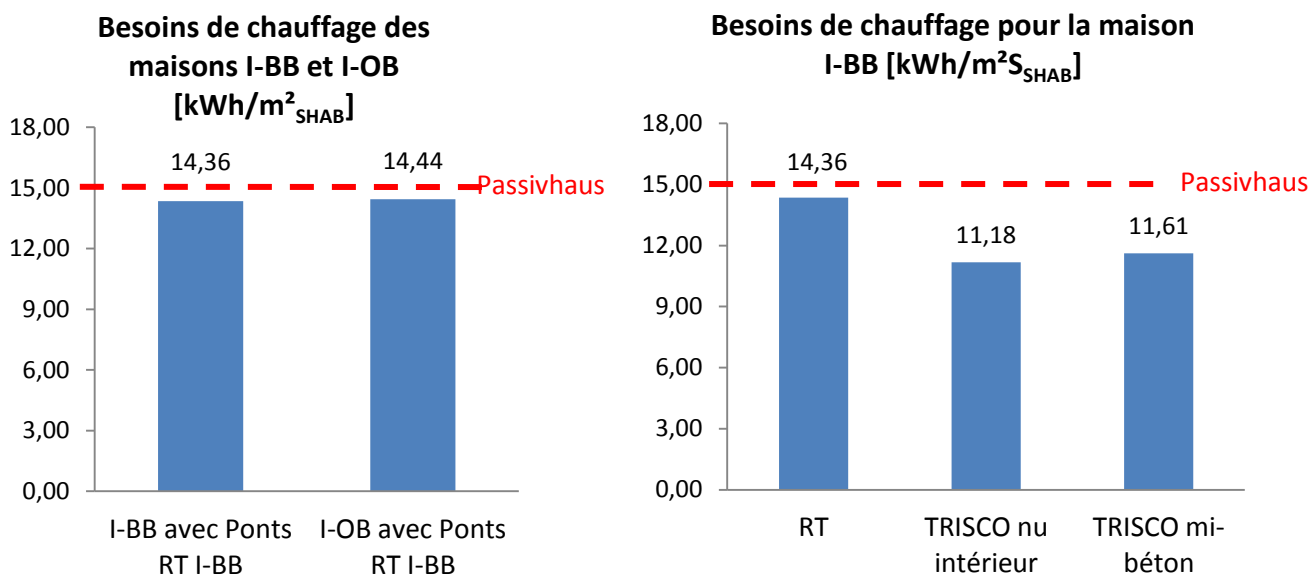


Figure 17 : Besoins de chauffage pour les variantes de ponts thermiques

En comparant les résultats de STD pour différents modes constructifs (I-BB et I-OB) à ponts thermiques égaux, on observe un écart très faible au niveau des besoins de chauffage. La maison I-OB a toutefois des besoins de chauffage plus importants. Cela peut s'expliquer par l'inertie plus légère de cette maison. I-OB réagit plus rapidement aux variations de température et lors d'une baisse des températures, il faudra donc davantage chauffer cette maison.

Pour les variantes de ponts thermiques de la maison I-BB (graphique de droite), on observe un écart relatif de plus de 22% sur les besoins de chauffage entre les variantes « ponts thermiques issus de la RT » et « ponts thermiques calculés avec le logiciel TRISCO ». Cela est lié à l'incertitude sur les ponts thermiques issus de la RT 2012 ; certaines des configurations constructives des maisons INCAS n'étant pas représentées dans le fascicule V des règles Th-U.

Pour la maison I-BB, les ponts thermiques ont été calculés de manière précise dans [Munaretto, 2014] (16) pour les conventions nu intérieur et mi béton. Cette deuxième configuration permettait de mieux prendre en compte l'inertie thermique. Afin de vérifier cette hypothèse, les courbes de températures ont été tracées et comparées à celles des températures extérieures.

Les résultats présentés ici correspondent aux courbes de température calculées dans le salon par le logiciel COMFIE au cours de la semaine du 23 au 30 juillet, Figure 18 (page 24). Sur le second graphique, Figure 19 (page 24), la température extérieure est observée.

Comme le montre la Figure 18 (page 24), les amplitudes de température sont plus importantes pour la convention nu intérieur. La maison I-BB réagit donc plus aux variations de températures pour cette convention. Globalement, sur l'année entière, lors des hausses de températures extérieures, il fait plus chaud dans la maison avec la convention nu intérieur parce qu'elle réagit plus vite à cette augmentation. Réciproquement, une baisse des températures extérieures se traduit par une température plus importante dans la maison mi béton qui met plus de temps à se refroidir. Cela illustre l'inertie plus importante de la maison I-BB mi béton.

Le déphasage entre les pics de température à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment est le même pour chaque maison puisque les matériaux sont identiques dans les deux simulations.



Figure 18 : Amplitudes de température dans le salon

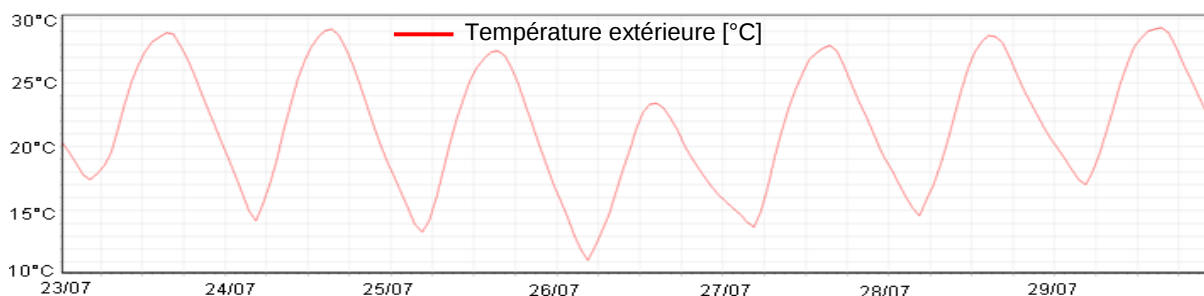


Figure 19 : Amplitude de température à l'extérieur

3.3.2 Production et consommation des maisons INCAS

A l'aide des données calculées par Pléiades + COMFIE pour différents **postes énergétiques**, un bilan annuel a été réalisé pour la maison I-BB, voir Figure 20. Une séparation a été faite entre les consommations (en énergie finale) et la production d'énergie. Les postes liés aux consommations concernent le chauffage, la ventilation, l'ECS, l'éclairage et l'électroménager. Tous utilisent l'**énergie électrique**. La partie production d'énergie est couverte par les panneaux photovoltaïques et solaires thermiques.

Pour l'électroménager, la consommation dépend du scénario de puissance dissipée. La consommation des auxiliaires de ventilation a été déterminée à partir de données fournies par le CEA suite à une campagne de mesure dans les maisons INCAS. Une consommation de 0,37 Wh/m³/ventilateur a été retenue.

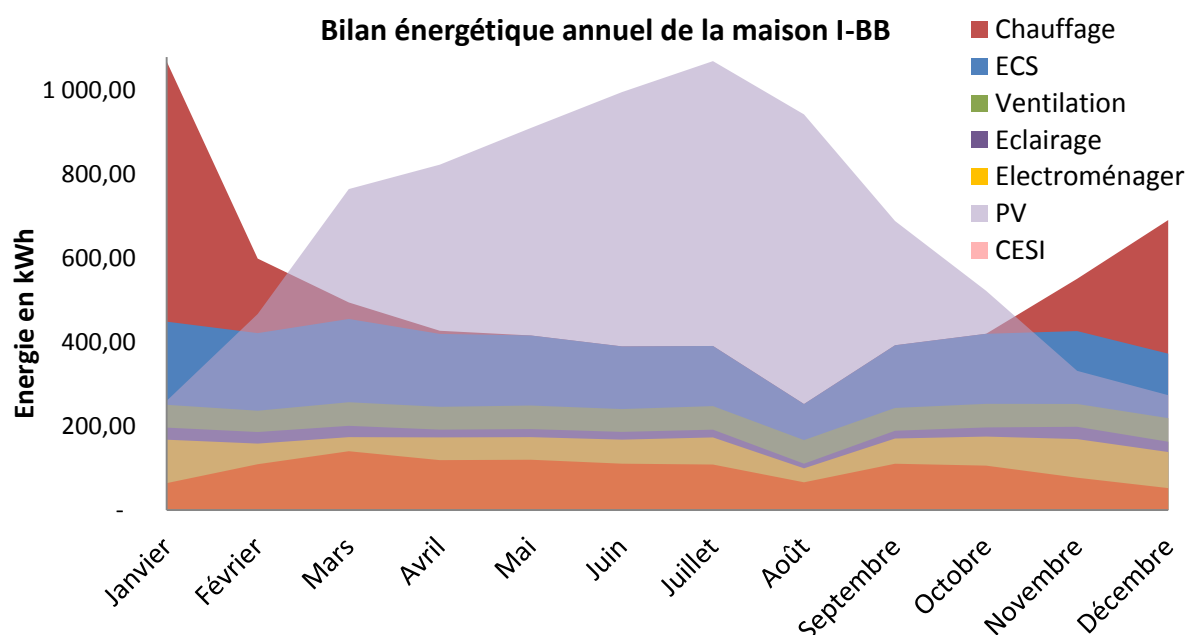


Figure 20 : Bilan énergétique annuel de la maison I-BB

Au mois d'août, on observe une diminution des besoins. Le bâtiment est en effet considéré comme inoccupé pendant les deux semaines de vacances définies dans les scénarios RT. De même, une semaine de vacances est prévue la dernière semaine de décembre, ce qui explique l'écart entre les consommations des mois de janvier et décembre.

La Figure 21 permet de récapituler les consommations en énergie finale et production pour les maisons INCAS.

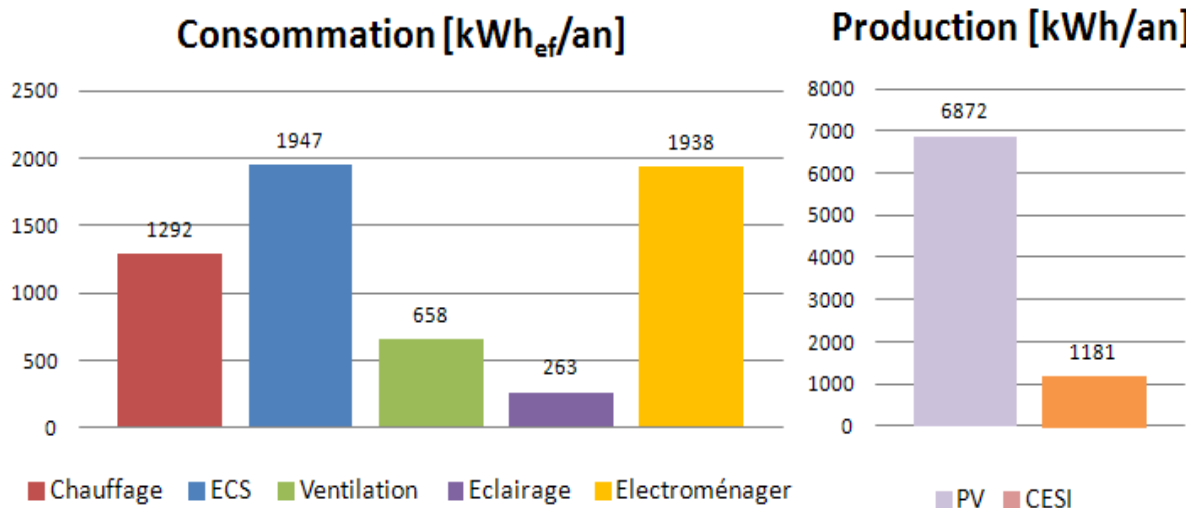


Figure 21: Consommation et production d'énergie pour la maison I-BB

Remarque :

- La consommation d'ECS représentée sur le graphique de gauche correspond à la consommation énergétique totale pour ce poste. Elle comprend la consommation électrique pour l'appoint (environ 39%) et la production solaire (environ 61%).

La consommation électrique totale pour les postes réglementaires et l'électroménager s'élève à 54,7 kWh_{ef}/m²_{SHAB}/an, si on ne considère pour l'ECS que la consommation d'électricité pour l'appoint. La production s'élève quant à elle à 76,4 kWh/m²_{SHAB}/an.

Globalement sur l'année, la production d'électricité est supérieure à la consommation. Cependant, en étudiant les productions et consommations au pas de temps horaire, on constate que les panneaux photovoltaïques ne permettent de couvrir que **22%** environ des consommations d'électricité. L'**autoconsommation** d'électricité est estimée à 17,0 kWh/m²_{SHAB}/an pour I-BB.

En soustrayant l'énergie autoconsommée à la consommation électrique totale, on obtient la consommation énergétique issue du réseau. Elle représente 37,7 kWh_{ef}/m²_{SHAB}/an soit une consommation en énergie primaire du réseau de 97,3 kWh_{ep}/m²_{SHAB}/an pour l'ensemble des postes réglementaire et l'électroménager.

Nota Bene

Dans cette partie, l'ensemble des hypothèses concernant la simulation thermique dynamique des maisons INCAS ont été répertoriées.

La description des bâtiments a été ajustée de telle manière à permettre une comparaison des modes constructifs toutes choses égales par ailleurs (géométrie, épaisseurs d'isolants, ponts thermiques...).

Les consommations énergétiques, données nécessaires pour la réalisation de l'analyse de cycle de vie, ont ensuite été déterminées.

4 Analyse de cycle de vie des maisons INCAS

Après avoir réalisé une étude énergétique des maisons INCAS, l'évaluation de leurs performances environnementales est entreprise avec les outils d'analyse de cycle de vie novaEquer et Elodie. L'objectif est de comparer les résultats donnés par les deux outils afin d'étudier leurs reproductibilités.

Dans un souci de **transparence**, toutes les **hypothèses spécifiques** à l'analyse de cycle de vie de cette étude sont **décrites** dans les paragraphes suivants.

4.1 Définition des objectifs et frontières de l'étude

Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude d'analyse de cycle de vie est de tester la reproductibilité des résultats d'ACV comparatives de bâtiments réels et performants énergétiquement avec les nouvelles versions des outils novaEquer et Elodie. Cela s'inscrit dans le cadre de la tâche 4.1 du projet de recherche BENEFIS (Bilan ENergétique et Environnemental Flable, Simple et reproductible des bâtiments) qui, pour rappel, a pour objectif de rendre accessible au plus grand nombre la démarche d'écoconception par l'ACV.

Cette étude comparative doit permettre d'identifier les problèmes de reproductibilité entre les outils et de déterminer leurs provenances. Suite à cela, des recommandations seront formulées pour améliorer la reproductivité.

Frontières du système

Le **périmètre d'étude** choisi pour le projet comprend l'ensemble des **matériaux** (décrit ou non en STD) et les **consommations énergétiques** pour l'ensemble des postes réglementaires. Les consommations d'énergie spécifiques sont également prises en compte. Enfin, les **consommations d'eau** et la phase chantier sont intégrées au périmètre.

Différentes **simulations** ont été réalisées sur ce périmètre d'étude. Elles portent principalement sur :

- L'étude des **variantes constructives** (béton banché, parpaing, ossature bois)
- L'étude des **énergies utilisées pour le chauffage** (électricité, gaz, bois)
- L'étude de l'**influence** de la présence ou de l'absence de **panneaux photovoltaïques**

La Figure 22 (en page 27), permet de visualiser les caractéristiques du périmètre d'étude.

Comme la Figure 22 (en page 27) le montre, ce périmètre n'est pas décrit de la même façon dans les outils novaEquer et Elodie. La différence réside dans la manière d'allouer les impacts liés à l'utilisation d'un produit recyclé ou liés à une production locale d'énergie.

Dans novaEquer, la méthode des impacts évités est utilisée. Le bénéfice de la part recyclée est répercuté à 50% en phase de fabrication du produit et à 50% en fin de vie. L'effet bénéfique du recyclage n'est ainsi répercuté que sur le bâtiment étudié (n). Les 50% restant à la fabrication et en fin de vie sont en effet comptabilisés respectivement pour le bâtiment (n-1) d'où provient le matériau recyclé et pour le bâtiment (n+1) ou sera utilisé le matériau recyclé en fin de vie du bâtiment étudié (n).

De même si de l'électricité produite par le bâtiment est exportée, novaEquer considère qu'il s'agit d'électricité que le réseau n'a pas eu besoin de produire. Cette production d'électricité a un effet bénéfique pour le bâtiment. Ainsi, les impacts de l'électricité exportée sont soustraits à ceux de l'électricité importée et autoconsommée

Dans l'outil Elodie, la méthode utilisée pour prendre en compte le recyclage est celle des stocks. En fin de vie, la part recyclée rejoint un stock qui est considéré comme un flux sortant auquel aucun impact n'est attribué. Le recyclage n'a alors pas d'effet bénéfique pour le

bâtiment étudié (n), toutefois le traitement après usage n'est pas considéré pour la partie recyclée. L'effet bénéfique est compté pour le bâtiment (n+1) utilisant les matériaux recyclés du bâtiment (n). La part de matériaux recyclés contribuant à la fabrication de (n+1) rejoint un stock, considéré comme un flux entrant, et auquel aucun impact n'est attribué, ce qui permet de diminuer les impacts liés à la fabrication de (n+1).

Concernant la production locale d'énergie, l'approche considérée dans Elodie est celle des co-produits. L'énergie exportée est considérée comme un service supplémentaire rendu par le bâtiment et à ce titre le bénéfice environnemental de l'export d'énergie ne peut pas être attribué au bâtiment. Les impacts de la production locale d'énergie sont alors affectés au prorata de l'énergie autoconsommée, le reste est affecté au réseau.

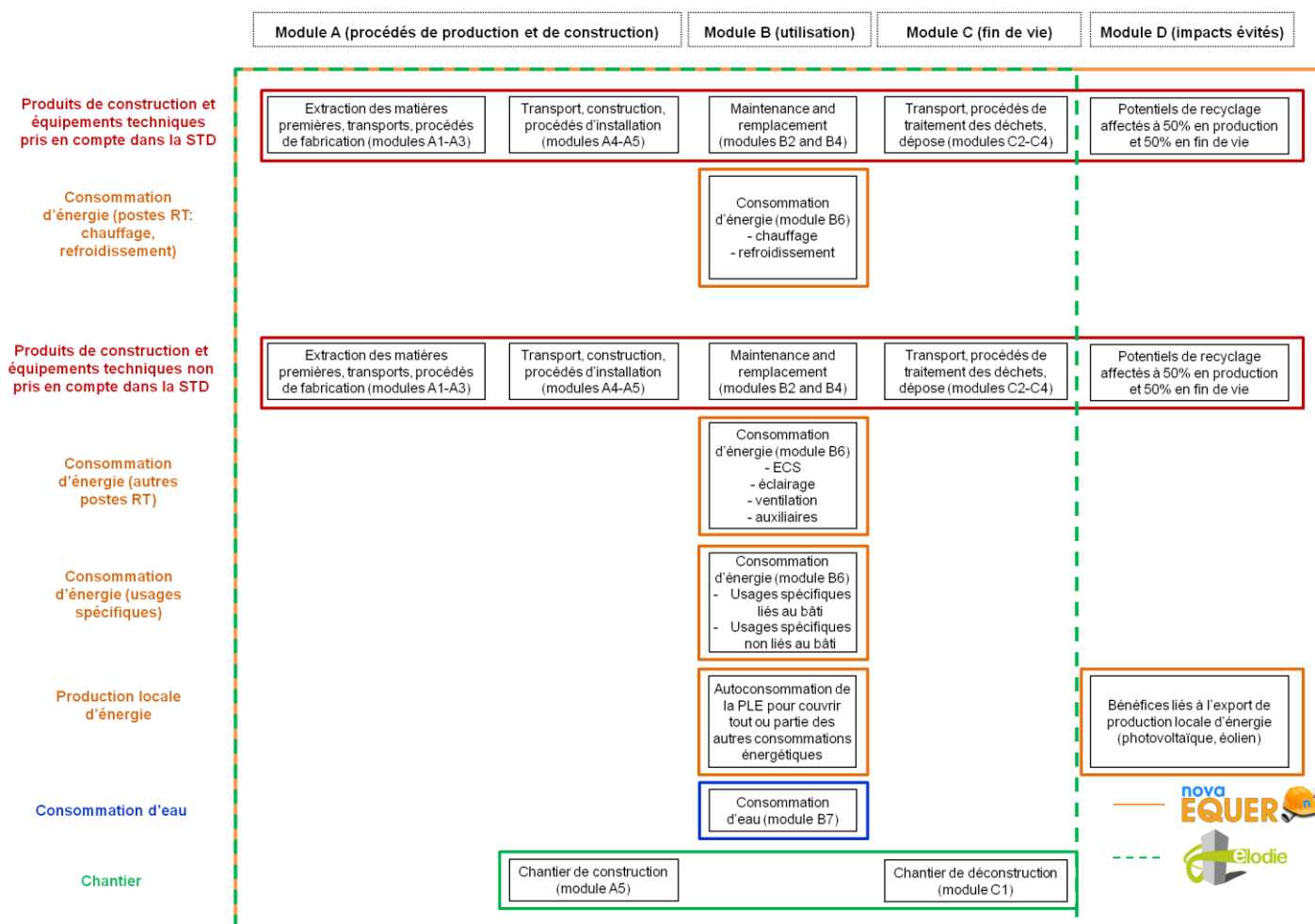


Figure 22 : Périmètre d'étude

Cas d'étude

Comme mentionné plus haut, les bâtiments choisis pour l'étude sont les maisons passives de la plateforme INCAS. L'ensemble des hypothèses prises pour la simulation thermique dynamique de ces maisons est précisé plus haut.

L'unité fonctionnelle peut être décrite de la manière suivante :

Maison individuelle de 90 m² habitable pour 2 adultes équivalents, sur 80 ans.

L'ensemble des hypothèses prises pour l'analyse de cycle de vie est décrit dans les paragraphes suivants. Il faut noter que les hypothèses ont été prises, dans la mesure du possible, **de manière à harmoniser les données d'entrée entre les deux outils**. Cette harmonisation est nécessaire à une comparaison précise de novaEquer et Elodie basée sur

les différences méthodologiques. Dans la suite, une étude de sensibilité est menée sur certains paramètres d'entrées qui varient entre les outils.

4.2 Les composants

Cette rubrique présente les hypothèses faites sur le choix des matériaux, composants et des équipements. Pour rappel, les origines des données pour chaque outil sont les suivantes :

- Dans novaEquer, les matériaux ont été sélectionnés dans la base de données de l'outil. Il s'agit de données de la base suisse Ecoinvent ajustées (conversion, composition, contextualisation, carbone biogénique).
- Dans Elodie les matériaux peuvent être sélectionnés parmi les FDES ou des données génériques (souvent de données Ecoinvent ajustées).

La description des composants utilisés pour les maisons ne se fait pas de la même manière dans les deux outils. La Figure 22 récapitule les éléments à décrire.

NovaEquer 	Elodie 
-Quantitatifs de matériaux transmis directement à partir de Pléiades -Associer les composants Pléiades à des composants de la base de données de novaEquer	-Renseigner manuellement les composants constitutifs des maisons -Associer les composants décrits à des FDES ou des données Elodie -Renseigner les quantitatifs des composants

Figure 22 : Eléments à renseigner dans les outils concernant la description des composants

La **saisie des métrés** dans Elodie à partir des données de Pléiades ou novaEquer peut constituer une source d'erreur. En effet, les métrés sont disponibles en m³ ou en kg dans Pléiades alors qu'ils doivent être saisis en m² de surface de paroi dans Elodie. Il faut donc être vigilant lors de la saisie des métrés dans Elodie. Les données saisies sont d'ailleurs **parfois incertaines** puisque pour certains composants, l'épaisseur prise en compte n'est pas précisée dans les FDES.

Des composants non décrits en STD comme les éléments de charpentes, de fondations, les paires pluies... ont été ajoutés pour le périmètre complet.

Les correspondances entre les composants de la STD et les fiches des bases de données des outils novaEquer et Elodie sont renseignées en annexe.

Afin d'**harmoniser les données d'entrées sur les composants** dans les deux outils, une comparaison des FDES et de données novaEquer a été réalisée. Pour certains matériaux et composants, les écarts entre bases de données sont présentés dans ce rapport.

Ces écarts sont toutefois à nuancer. Des FDES contenant des données sur l'ensemble du cycle de vie d'un matériau ont été comparés à des données Ecoinvent pour la fabrication et l'élimination. Cependant, les transports du site de production au chantier et du chantier à la mise en décharge n'ont pas été ajoutés aux données Ecoinvent alors qu'ils sont contenus dans les FDES. Cela peut avoir de l'influence sur l'indicateur acidification puisque les transports sont responsables d'émissions de substances acidifiantes.

La première harmonisation concernait les **fins de vie des matériaux** . Dans les FDES, on considère une mise en décharge pour la plupart des matériaux, toutefois certains sont en partie recyclés. C'est notamment le cas des bétons, considérés comme recyclés à 75%. Dans novaEquer, la solution proposée par défaut à l'utilisateur est de considérer tous les matériaux comme des déchets inertes en fin de vie. Cependant, afin d'avoir les mêmes hypothèses dans les deux outils, les matériaux partiellement recyclés dans les FDES ont aussi été considérés comme en partie recyclés dans novaEquer.

Ensuite, pour chaque élément nécessaire à la modélisation des maisons INCAS, les valeurs d'impacts obtenues entre les deux bases de données ont été comparées pour les indicateurs environnementaux communs aux deux bases. Le Figure 23 présente les résultats des **comparaisons de valeurs d'impacts** pour quelques matériaux, la comparaison pour l'ensemble des matériaux est présentée en annexe.

Ecart relatif (Ecoinvent-FDES)/FDES	GWP100	Acidification	Energie	Eau	Déchets	O3-smog	Déchets radioactifs
Béton banché armé avec 75% recyclage	-38%	-42%	-20%	138%	-46%	-64%	-3%
Laine de verre	113%	40%	37%	79%	56%	64%	3%
Tuiles	21%	-11%	-25%	-32%	-1%	-49%	-69%
Peinture eau	-19%	-15%	-30%	-20%	-26%	-96%	-32%
Porte extérieure	-97%	-98%	-95%	-98%	-95%	-93%	-99%
Parpaings avec mortier	45%	-8%	13%	395%	0%	-10%	-24%
Bois lourd	130%	-57%	13%	-37%	16%	-81%	-58%
Laine de bois	71%	-24%	-5%	30%	1%	-52%	51%

Figure 23 : Ecart relatif entre les valeurs d'impacts pour quelques matériaux

Pour les composants présentant les plus forts écarts, une **analyse des sous-constituants** a été réalisée afin de **déterminer la provenance de l'écart** et de tenter de le diminuer. Ce travail a par exemple été réalisé pour les portes. Dans novaEquer, les portes sont constituées d'une planche en bois tandis qu'elles contiennent de l'acier et de l'isolant en plus du bois dans les FDES. Une porte contenant les mêmes proportions de chaque matériau a donc été créée dans novaEquer. Cependant, les écarts restant du même ordre de grandeur, les entrées des bases de données n'ont pas été modifiées sur ce composant.

En appliquant cette méthode, certains matériaux de novaEquer ont été adaptés, c'est le cas par exemple du béton auquel de l'acier a été ajouté ou encore des parpaings auxquels du mortier a été ajouté, voir la Figure 24.

Ecart relatif (Ecoinvent-FDES)/FDES	GWP100	Acidification	Energie	Eau	Déchets	O3-smog	Déchets radioactifs
Parpaings sans mortier	97%	28%	31%	413%	3%	-64%	-24%
Parpaings avec mortier	45%	-8%	13%	395%	0%	-10%	-24%

Figure 24 : Ecart relatif avant et après harmonisation sur les parpaings

Pour certains matériaux, seuls **quelques indicateurs** présentent de grands écarts. Pour les composants à base de béton par exemple, l'écart sur l'eau utilisée est toujours supérieur à 100%. Dans la base de données Ecoinvent, la part d'eau considérée pour la fabrication des bétons est toujours nettement supérieure à celle des FDES. Cela est dû au type de granulats utilisés pour les bétons, issus principalement d'alluvion de rivière dans les FDES et de carrière dans Ecoinvent.

D'autre part, pour les matériaux en bois, un écart important est observé sur l'indicateur GWP. Cela est lié à une prise en compte différente du carbone biogénique dans les deux bases de données.

Pour la laine de verre, l'écart sur l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique n'a en revanche pas pu être expliqué.

Enfin pour l'indicateur « formation d'ozone photochimique », les écarts sont importants pour presque tous les matériaux. Cela s'explique par les **différentes méthodologies** utilisées pour calculer cet indicateur dans les bases de données Ecoinvent et INIES.

D'autres composants ont été ajoutés aux simulations des maisons, il s'agit des équipements tels que la VMC, le ballon d'eau chaude, les conduits aérauliques, la tuyauterie. Les

panneaux photovoltaïques sont aussi ajoutés pour l'une des variantes. Pour le chauffage, aucun équipement n'est modélisé pour la variante de base : chauffage à l'électricité. En effet, l'élément chauffant n'est constitué que d'une résistance chauffante placée dans la VMC. En revanche pour les variantes énergétiques gaz et bois, des chaudières sont ajoutées.

Les données Elodie ne répertorient que la chaudière gaz et les panneaux photovoltaïques, de nouvelles fiches Elodie ont été créées pour les autres équipements. Cela permettait d'harmoniser les descriptions des composants sans perdre d'informations sur les équipements utilisés dans les maisons INCAS. Les valeurs des indicateurs environnementaux renseignés pour les nouvelles fiches Elodie correspondent alors à celles de la base de données de novaEquer.

4.3 L'énergie

Les hypothèses prises pour l'énergie concernent la **manière de renseigner les consommations énergétiques** dans les deux outils ainsi que les caractéristiques des vecteurs énergétiques retenus : électricité, gaz et bois. La description varie en effet d'un outil à l'autre.

La Figure 25 présente les éléments à détailler dans les deux outils :

	NovaEquer 	Elodie 
Chauffage	-Besoins de chauffage directement transmis par Pléiades	-Renseigner les consommations pour le chauffage en énergie finale
ECS	-Renseigner le volume d'eau chaude puisé par habitant et par an	-Renseigner les consommations pour l'ECS en énergie finale
Ventilation	-Renseigner les consommations pour la ventilation en énergie finale dans les consommations électriques additionnelles	-Renseigner les consommations pour la ventilation en énergie finale
Eclairage	-Consommations issues du scénario de puissance dissipée, directement transmises par Pléiades	-Renseigner les consommations pour l'éclairage en énergie finale
Electro-ménager	-Consommations issues du scénario de puissance dissipée, directement transmises par Pléiades	-Renseigner les consommations pour l'électroménager en énergie finale
PV	-Production au niveau de l'onduleur directement transmise par Pléiades	-Renseigner la production totale d'électricité sur la parcelle ainsi que la part autoconsommée

Figure 25 : Eléments à renseigner dans les outils concernant l'énergie

Remarques :

- Les consommations en kWh/an sont données pour chaque poste dans la rubrique concernant les résultats de STD.
- Pour l'ECS, le calcul des consommations est réalisé directement par le logiciel dans novaEquer, lorsque l'utilisateur saisi les volumes d'eau chaude puisée.
- Toutes les données transmises directement de Pléiades vers novaEquer sont au pas de temps horaire. Les autres données renseignées dans novaEquer et dans Elodie sont au pas de temps annuel.

Pour chaque poste réglementaire et pour l'électroménager, il faut indiquer le type d'énergie utilisé. Pour la ventilation, l'éclairage et l'électroménager, il s'agit d'électricité. Pour le chauffage et l'ECS, trois variantes sont étudiées, correspondant aux vecteurs électricité, gaz naturel ou bois énergie.

Vecteur électricité

Le vecteur électricité constitue la variante de base. En effet, les maisons INCAS sont chauffées à l'électricité. Un mix électrique fixe correspondant au mix français de 2010 est utilisé dans les deux outils.

Une variante consiste à considérer dans novaEquer un mix électrique dynamique qui varie heure par heure et qui diffère en fonction de l'usage de l'électricité. Cette variante, plus précise, ne peut pas être implémentée dans Elodie où seuls des consommations et mix annuels sont renseignés.

Vecteur gaz naturel

Le vecteur gaz est utilisé en variante pour le chauffage et l'ECS. Dans les deux outils, un rendement de chaudière de 102% est considéré.

Si le vecteur gaz est considéré, il faut ajouter une chaudière gaz aux équipements.

Vecteur bois

Le vecteur bois est utilisé en variante pour le chauffage et l'ECS. Dans les deux outils, un rendement de chaudière de 75% est considéré et les impacts liés correspondent à ceux de la combustion pour une chaudière bois bûches de 6 kW.

Si le vecteur gaz est considéré, il faut ajouter une chaudière bois aux équipements.

4.4 L'eau

Il s'agit ici d'harmoniser les **volumes d'eau puisée**. La Figure 26 présente le mode de description pour le contributeur de consommation d'eau dans les deux outils :

NovaEquer 	Elodie 
-Renseigner les quantités d'eau froide (par défaut 100 l/j/pers) et d'eau chaude consommée (par défaut 40 l/j/pers) -Renseigner les pertes du réseau de distribution (par défaut 20%)	-Renseigner la quantité d'eau totale consommée -Renseigner les pertes du réseau de distribution (par défaut 5%)

Figure 26 : Eléments à renseigner dans les outils concernant les puisages d'eau

La quantité d'eau chaude consommée sur l'année a été calculée en se basant sur les méthodes Th-BCE, comme expliqué dans la partie détaillant les hypothèses de STD. Le volume d'eau froide a été considéré comme étant égal à 100 litres par jour et par personne et les pertes du réseau de distribution ont été fixées à 5%.

Dans novaEquer, le fait de distinguer les volumes d'eau chaude puisés de ceux d'eau froide permet la réalisation d'un calcul des consommations liées à l'ECS.

4.5 La phase chantier

La prise en compte du chantier dans cette étude ne concerne pas le contributeur chantier d'Elodie. Rien n'est rempli pour ce contributeur puisqu'il n'a pas de correspondance dans novaEquer et que les données à renseigner se sont pas connues.

Pour caractériser, l'étape chantier, un surplus de matériaux a toutefois été pris en compte. Il correspond aux pertes de matières lors de la mise en œuvre. Dans les FDES, un surplus de matériau, variant de 0 à 9% selon le composant considéré, est comptabilisé. Un surplus de

matériaux de 5% a alors été considéré dans novaEquer, ce pourcentage correspond à la valeur par défaut pour le surplus.

- Les outils d'ACV novaEquer et Elodie permettent de prendre en compte d'autres paramètres pour la phase d'utilisation du bâtiment tels que les déchets ménagers ou les transports des occupants. Cependant, ces deux paramètres n'entrant pas dans le champ de l'étude d'ACV comparative, ils n'ont pas été renseignés.

4.6 Remarque

Un autre périmètre d'étude a été défini. Il s'agit d'un périmètre d'étude ne regroupant que les matériaux décrits en STD et le poste réglementaire lié au chauffage.

La Figure 28 présente les caractéristiques de ce périmètre d'étude réduit.

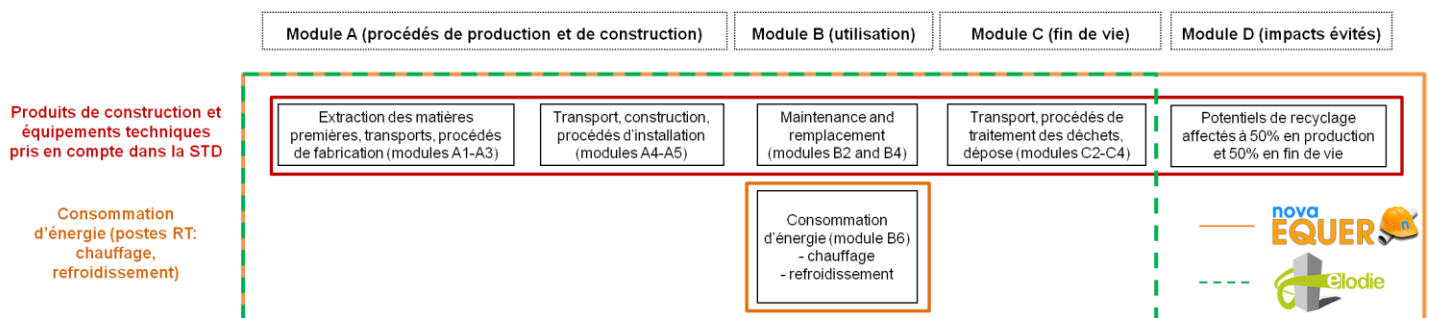


Figure 28 : Périmètre d'étude réduit

Les principales simulations effectuées sur ce périmètre pour les deux logiciels concernent :

- L'étude des variantes constructives (béton banché, parpaing, ossature bois)

Il sera alors possible d'évaluer les écarts entre un périmètre d'étude réduit et un périmètre complet et d'estimer les erreurs commises sur chaque indicateur environnemental en ne considérant pas le projet dans sa globalité.

Nota Bene

Dans cette partie, l'ensemble des hypothèses pour l'analyse de cycle de vie des maisons INCAS ont été répertoriées.

Le périmètre d'étude et l'unité ont fonctionnelle ont été décrit. On s'intéresse à une *maison individuelle de 90 m² habitable pour 2 adultes équivalents, sur 80 ans.*

Pour ne pas biaiser la comparaison des outils, un travail d'harmonisation des données d'entrées a été réalisé. Il a notamment porté sur :

- L'harmonisation des éléments saisis par l'utilisateur sur les interfaces des outils
- L'harmonisation des bases de données

5 Résultats et étude de reproductibilité des ACV comparatives

Dans ce chapitre sont présentés quelques-uns des **résultats d'ACV** obtenus en comparant les outils novaEquer et Elodie. Une analyse des écarts est ensuite réalisée pour déterminer leurs provenances.

La Figure 27 détaille l'ensemble des simulations réalisées :

Simulations	NovaEquer 	Elodie 
Variantes constructives sur le périmètre réduit	-Comparaison des maisons I-BB, I-DM, I-OB	-Comparaison des maisons I-BB, I-DM, I-OB
Variantes constructives	-Comparaison des maisons I-BB, I-DM, I-OB	-Comparaison des maisons I-BB, I-DM, I-OB
	-Comparaison des maisons I-BB, I-DM et I-OB avec différents types de ponts thermiques	-Comparaison des maisons I-BB, I-DM et I-OB avec différents types de ponts thermiques
	-Comparaison des maisons I-BB, I-DM et I-OB utilisant différents types de béton -Comparaison des maisons I-BB, I-DM et I-OB avec et sans prise en compte du carbone biogénique	-Comparaison des maisons I-BB, I-DM et I-OB avec différents types de ponts thermiques
Variantes de vecteurs énergétiques	-Comparaison des énergies électricité, gaz et bois pour le chauffage et l'ECS avec un mix électrique fixe -Comparaison énergies électricité, gaz et bois pour le chauffage et l'ECS avec un mix électrique dynamique	-Comparaison des énergies électricité, gaz et bois pour le chauffage et l'ECS avec un mix électrique fixe
Variantes avec ou sans panneaux photovoltaïques	-Influence des PV avec un bilan énergétique horaire et un mix électrique annuel -Influence des PV avec un bilan énergétique horaire et un mix électrique horaire	-Influence des PV avec un bilan énergétique annuel et un mix électrique annuel -Influence des PV avec un bilan énergétique horaire et un mix électrique annuel

Figure 27 : Récapitulatif des simulations réalisées

Les résultats présentés dans le rapport concernent les variantes de vecteurs énergétiques et celles sur l'influence de la présence ou l'absence de panneaux photovoltaïques. Concernant, les résultats pour variantes constructives, seule la comparaison des trois maisons est présentée ici, les résultats des comparaisons complémentaires sont en annexe.

Les résultats des simulations sont présentés sous forme de diagramme radar. Chaque axe du diagramme correspond à l'un des sept indicateurs environnementaux commun à novaEquer et Elodie. Pour chaque indicateur, la variante ayant la valeur d'impact la plus importante a été prise comme référence (100%) ; les autres variantes sont représentées en valeurs relatives par rapport à la référence.

5.1 Les variantes vecteurs énergétiques

5.1.1 Utilisation d'un mix électrique fixe dans les deux outils

Pour ces variantes, il s'agit de comparer différents **vecteurs énergétiques pour le chauffage et la production d'ECS**. L'électricité, le gaz et le bois sont les trois cas étudiés. Les simulations portent sur la maison INCAS en béton banché I-BB. Pour ces simulations, un mix électrique fixe est utilisé dans les deux outils, il correspond au mix français de l'année 2010.

La Figure 28 présente les résultats obtenus avec chaque outil sur l'ensemble du cycle de vie.

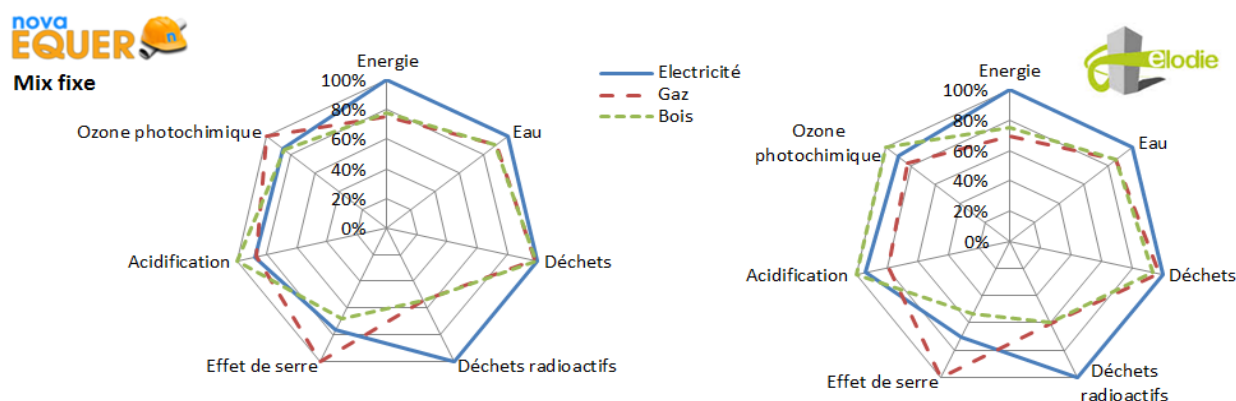


Figure 28 : Comparaison des vecteurs énergétiques avec novaEquer et Elodie

Les diagrammes obtenus avec chacun des deux outils ont un **profil similaire**. Dans tous les cas, ils classent la variante électricité comme la plus défavorable pour 4 des 7 indicateurs communs. Cela est lié au facteur pénalisant de 2,58, permettant de passer de la consommation d'énergie finale à celle en énergie primaire pour l'électricité. En pratique, les maisons chauffées à l'électricité sont généralement plus isolées afin d'atténuer les différences avec les autres énergies. Avec la variante électricité, la consommation d'énergie primaire est supérieure de plus de 20% à celle des variantes gaz et bois.

Aucun des deux outils ne permet réellement de privilégier les variantes gaz et bois. On note une **inversion de classement** sur l'indicateur de formation d'ozone photochimique. D'autre part, les écarts de classement peuvent varier sur certains indicateurs d'un outil à l'autre, c'est le cas notamment pour l'énergie, l'effet de serre et l'acidification. Enfin, il n'est pas toujours possible de déterminer s'il y a des inversions de classements entre les deux outils puisque les résultats de plusieurs variantes sont parfois confondus.

Une répartition par lots a été réalisée, pour tenter de déterminer les origines des écarts entre les deux outils. Les graphiques par lots pour les trois vecteurs énergétiques (présentés à la Figure 29 en page 35) montrant les mêmes tendances, seuls ceux pour le vecteur électricité sont présentés ici.

Ces graphiques mettent en avant des différences au niveau de la répartition par lots pour certains indicateurs.

- Pour les déchets, le principal contributeur est le mur extérieur dans Elodie alors que dans novaEquer, le plancher intermédiaire contribue également beaucoup à la production de déchets.
- Pour les déchets radioactifs l'énergie est le contributeur majoritaire dans novaEquer. Dans Elodie, la part des équipements est également importante, ce qui d'autant plus surprenant que les données sur équipements ont été harmonisées.

- Pour l'ozone photochimique ; dans Elodie, la production est essentiellement liée aux murs extérieurs (près de 60% des contributions) tandis que dans novaEquer, les contributeurs pour cet indicateur sont divers.

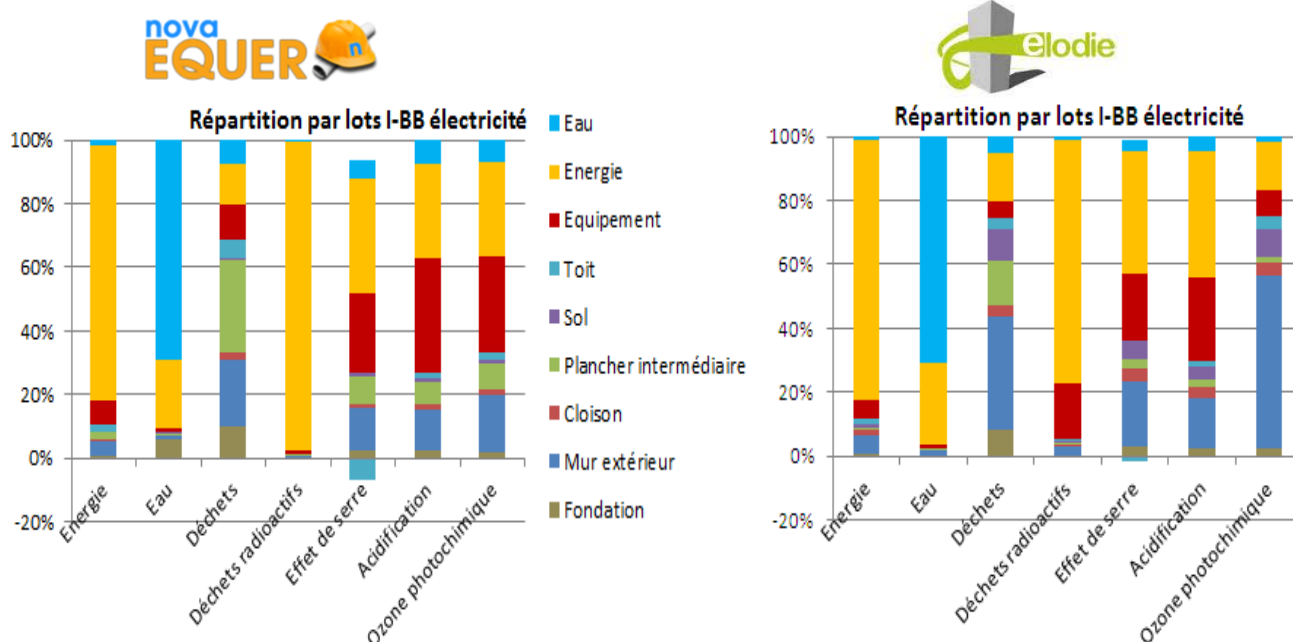
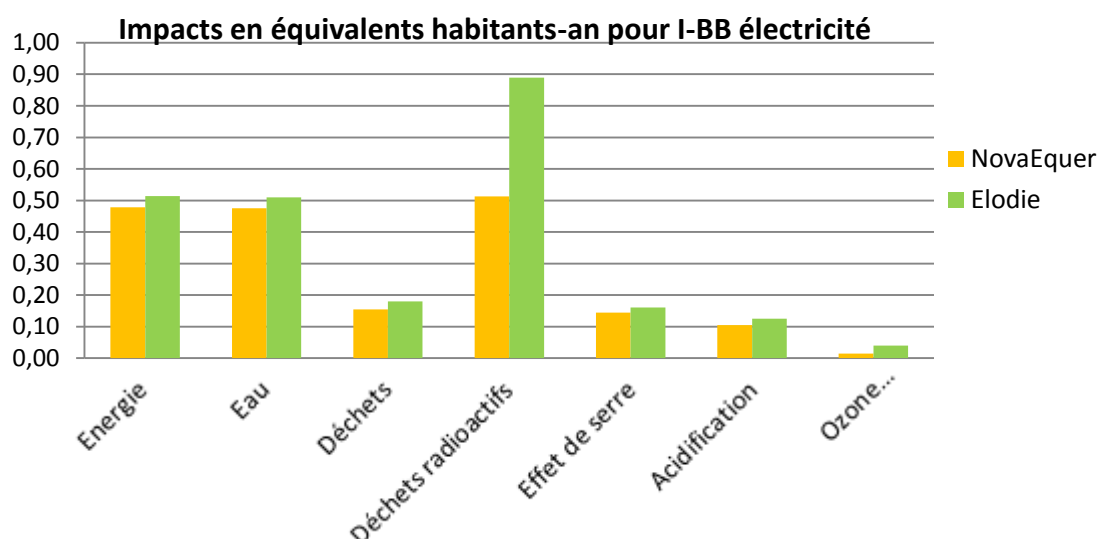


Figure 29 : Répartition des impacts par lots pour chaque indicateur

Des normalisations ont également été faites afin de d'établir un ordre de priorité entre les indicateurs, elles sont présentées à la Figure 30 en page 35 et 36. Elles permettent de visualiser d'une manière différente les écarts entre les outils.

Ces graphiques permettent de confirmer les premières remarques faites sur les diagrammes radars. La variante **électricité** est celle pour laquelle **les impacts** sont **les plus importants** pour chaque indicateur et il est difficile d'effectuer un choix entre les variantes gaz et bois dans les deux outils.

Les répartitions par lots permettent également de constater que l'écart le plus important entre les outils est sur l'indicateur de déchets radioactifs. Les indicateurs d'énergie, d'eau consommée et de déchets radioactifs sont ceux qui dans tous les cas ont la plus grande importance relative. L'indicateur de formation d'ozone photochimique a une importance relative moindre, cela permet de relativiser les problèmes de reproductibilité observés.



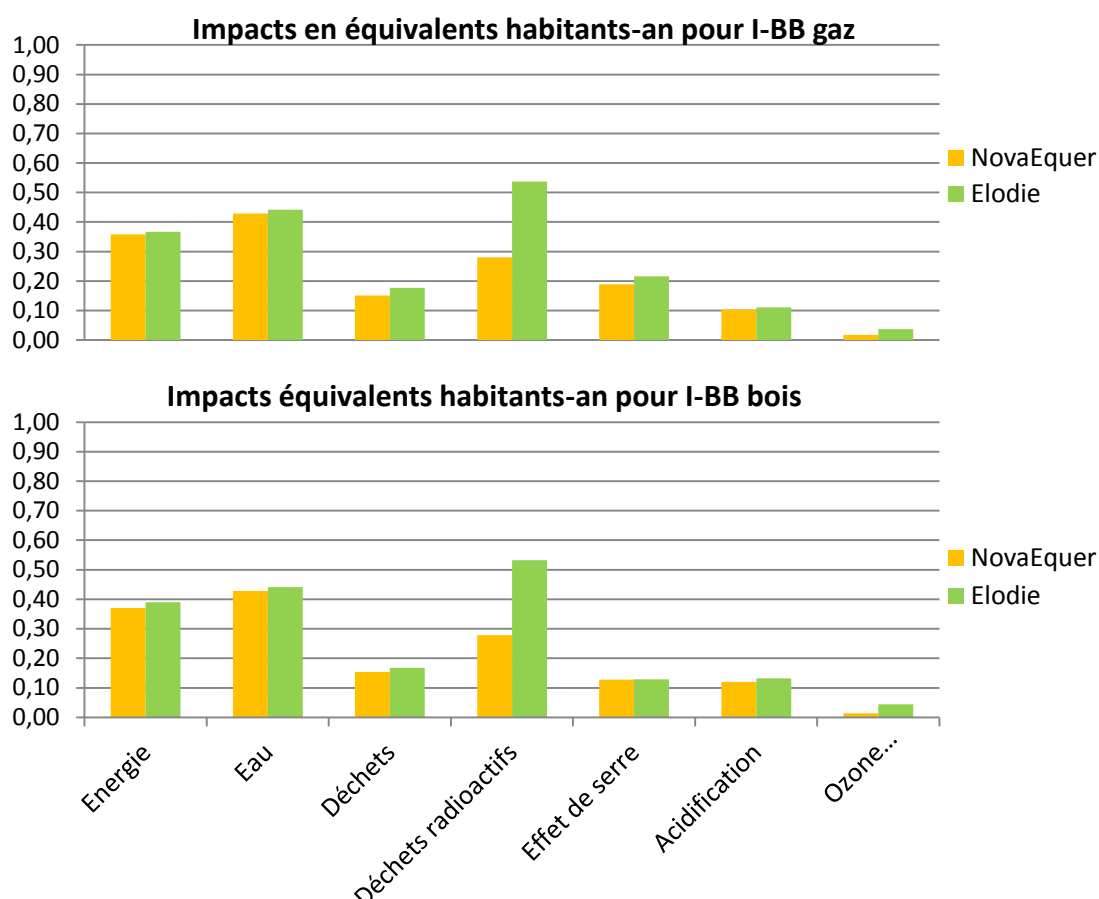


Figure 30 : Normalisation des impacts pour les maisons I-BB avec trois vecteurs énergétiques

Un mode de présentation des résultats sous forme de tableau synthétique a été adopté dans le cadre du projet BENEFIG. Il permet de regrouper les résultats des ACV comparatives et rend plus visuel les éventuels problèmes de reproductibilité sur les indicateurs environnementaux.

Dans ce tableau il faut renseigner d'une part si une inversion de classement est observée entre les deux outils et d'autre part si novaEquer et Elodie donnent ou non la même meilleure variante. Pour ces deux critères un jeu de couleur est utilisé (voir Figure 31).

Classement des variantes	Meilleure variante
Class. Pas d'inversion de classement Inversion de classement Difficile de conclure	1ère Meilleure variante identique Meilleure variante différente Difficile de conclure

Figure 31 : Légende pour la présentation des résultats

Le tableau synthétique présente également les écarts à la moyenne entre novaEquer et Elodie pour chaque indicateur, calculé par la formule $\frac{(NovaEquer - Elodie)}{\text{moyenne}(NovaEquer; Elodie)}$.

Pour les variantes de vecteur énergétique, les résultats détaillés sont donnés dans la Figure 32 en page 37.

	Comparaison des variantes	Valeurs d'impacts (Electricité)	Valeurs d'impacts (Gaz)	Valeurs d'impacts (Bois)
	Class. 1ère	Ecart*	Ecart*	Ecart*
Energie primaire totale		-7%	-2%	-5%
Consommation d'eau totale		-7%	-3%	-3%
Déchets éliminés		-15%	-16%	-9%
Déchets radioactifs		-54%	-63%	-63%
Changement climatique		-11%	-13%	-1%
Acidification atmosphérique		-17%	-7%	-10%
Formation d'ozone photochimique		-93%	-74%	-102%

* Ecart à la moyenne entre les deux outils

Figure 32 : Résultats détaillés pour les variantes de vecteur énergétique

On peut y constater que les **écarts** à la moyenne sont importants pour les indicateurs de production de **déchets radioactifs** et de **production d'ozone photochimique**.

L'indicateur de production d'ozone photochimique est l'indicateur environnemental posant le plus gros problème de reproductibilité puisqu'il présente à la fois une inversion de classement et des écarts importants entre les deux outils.

Pour beaucoup d'indicateurs, il n'est pas possible de conclure sur la reproductibilité des résultats puisque les valeurs d'impacts sont proches d'une variante à l'autre.

Les paragraphes suivants, une interprétation des résultats est réalisée. Il s'agit d'identifier les origines des écarts entre les outils.

➤ **Energie** : on note une bonne reproductibilité sur cet indicateur. L'écart entre les outils est légèrement moins important pour la variante gaz. Cela peut s'expliquer par la **différence sur les fiches des vecteurs énergétique**, voir la Figure 33. Pour le gaz, l'énergie consommée est plus importante dans Ecoinvent que dans la DES de Elodie.

Ecart relatif (Ecoinvent-DES)/DES	GWP100	acidification	énergie	eau	déchets	O3-smog	déchets rad.
Gaz	13%	28%	13%	43%	38%	138159%	-22%
Bois	-2105%	17%	3%	145%	898%	-82%	-100%
Electricité	-4%	-36%	-6%	-20%	-25%	-27%	-38%

Figure 33 : Ecart relatif entre les bases de données sur les fiches de vecteur énergétique

➤ **Eau** : on note une bonne reproductibilité sur cet indicateur. L'écart entre les outils est légèrement plus important pour la variante électricité. Cela peut s'expliquer par la **différence sur les fiches des vecteurs énergétique**. Pour l'électricité, l'eau consommée est moins importante dans Ecoinvent que dans la DES, comme on peut le voir à la Figure 33.

➤ **Déchets éliminés** : dans Elodie, la quantité de déchets produits est plus importante que dans novaEquer. Cette différence s'observe surtout pour les variantes électricité et gaz. En observant les **écarts entre les vecteurs énergétiques**, on remarque une production plus faible de déchets dans Ecoinvent seulement pour le vecteur électricité. Or, dans les trois variantes de l'électricité est utilisée au moins pour les postes réglementaires ventilation et éclairage et pour l'électroménager. C'est pour cette raison qu'au total la production de déchets est moins importante dans novaEquer.

L'écart entre les outils est plus important dans la variante gaz que dans la variante bois. Cela est lié au fait que le vecteur énergétique bois est responsable d'une quantité de déchets produits beaucoup plus importante dans Ecoinvent.

➤ **Déchets radioactifs** : les écarts en termes de valeur d'impact sont assez importants entre les deux outils. Dans Elodie, la quantité de déchets radioactifs produits est beaucoup plus importante que dans novaEquer. Cela est directement **lié aux bases de données** comme le montre les tableaux avec les écarts entre Ecoinvent et les FDES (Figure 23, Figure 24 et Figure 33 en pages 29 et 37). Cela peut aussi provenir de la différence au niveau des équipements comme le montre les répartitions par lots Figure 29 en page 35.

➤ **Effet de serre** : on note une bonne reproductibilité entre les deux outils pour cet indicateur environnemental. Pour la variante bois, la **valeur du vecteur énergétique** est négative dans Elodie, voir Figure 33. C'est pour cela que, pour l'indicateur effet de serre, les écarts sont plus faibles entre les deux bases de données. Cependant, la valeur d'Elodie mériterait vérification. En effet, le bois étant incinéré en fin de vie, son bilan ne peut être négatif.

➤ **Acidification** : le tableau de résultats détaillé montre que cet indicateur donne des impacts plus importants dans Elodie. L'écart le plus important est constaté pour la variante électricité. Cela est normal car c'est la seule fiche énergétique pour laquelle les données Ecoinvent ont moins d'impact sur l'acidification. Malgré le fait que les fiches gaz et bois aient plus d'impact sur l'acidification dans Ecoinvent, sur l'ensemble du cycle de vie on remarque que les impacts sont les plus importants dans Elodie. En effet, dans la plupart des cas, pour les composants, les **données des FDES** ont un impact plus important sur l'acidification comme le montre la Figure 34 pour quelques matériaux.

Les écarts présentés ci-dessous pour l'acidification sont toutefois à nuancer. Dans la base de données INIES, les transports sont intégrés aux FDES alors que dans novaEquer, l'utilisateur choisit une distance pour le transport qui est comptée séparément. Or dans le tableau ci-dessous, les transports, qui contribuent fortement à l'acidification n'ont pas été ajoutés aux données novaEquer.

Ecart relatif (Ecoinvent-FDES)/FDES	GWP100	acidification	énergie	eau	déchets	O3-smog	déchets rad.
Fenêtre double vitrage	-40%	-39%	-47%	-82%	-41%	-16%	-90%
Béton banché armé avec 75% recyclage	-38%	-42%	-20%	138%	-46%	-64%	-3%
Carrelage	-4%	1%	-1%	-61%	-58%	31606%	-28%
Chape béton armé	13%	-17%	10%	118%	76%	-63%	-25%
LDV Isoconfort 32	113%	40%	37%	79%	56%	64%	3%
LDV Isoconfort 35	173%	-10%	88%	233%	69%	4%	68%
Polystyrène extrudé Co2	-18%	-14%	-4%	-8%	-65%	-89%	-93%
Peinture eau	-19%	-15%	-30%	-20%	-26%	-96%	-32%

Figure 34 : Ecart relatif entre les bases de données pour certains matériaux de I-BB

➤ **Formation d'ozone photochimique** : l'écart important s'explique par la **différence de méthode de calcul** entre Ecoinvent et la norme NF P01-010 utilisée dans les FDES pour cet indicateur.

Dans novaEquer, la méthode choisie pour décrire la formation d'ozone photochimique est CML 2001. La formule suivante est appliquée pour déterminer la valeur de l'indicateur en kg équivalent éthylène.

$$\text{Ozone photochimique} = \sum_i \text{POCP}_i * m_i \text{ [kg C}_2\text{H}_4 \text{ équivalent]} \quad (20)$$

Où les m_i représentent les masses de substances émises et les POCP_i sont des coefficients d'agrégation permettant pour chaque substance de se ramener à 1kg de C_2H_4 .

Les POCP prennent des valeurs variant de -0,427 à 1,38 pour les substances de la méthode CML 2001.

Le potentiel de formation d'ozone photochimique n'est pas évalué de la même manière dans les FDES. La norme NF P01-010 donne une méthode simplifiée pour l'estimer qui revient à considérer un coefficient d'agrégation fixe, quelle que soit la substance.

$$\text{Ozone photochimique} = \sum_i 0,40 * m_i \text{ [kg } C_2H_4 \text{ équivalent]} \quad (21)$$

Malgré l'écart important et la non reproductibilité des résultats pour l'indicateur de formation d'ozone photochimique, les normalisations permettent de **relativiser l'importance de cet indicateur** dont l'impact moyen en habitant-an est toujours le plus faible.

5.1.2 Utilisation d'un mix dynamique dans novaEquer

Il s'agit toujours de comparer les vecteurs énergétiques dans cette variante, cependant, un **mix électrique dynamique** est utilisé dans novaEquer. Pour celui-ci, on considère que le mix varie de manière horaire est qu'il dépend du type d'usage. Cette approche a été développée dans [Herfray, 2011] (20) à partir du mix électrique de l'année 2008.

La Figure 35 présente les résultats obtenus pour chaque indicateur sous forme de diagramme radar. Dans novaEquer, le mix fixe est présenté en plus du mix dynamique. Cela permet de comparer les deux mix dans cet outil.

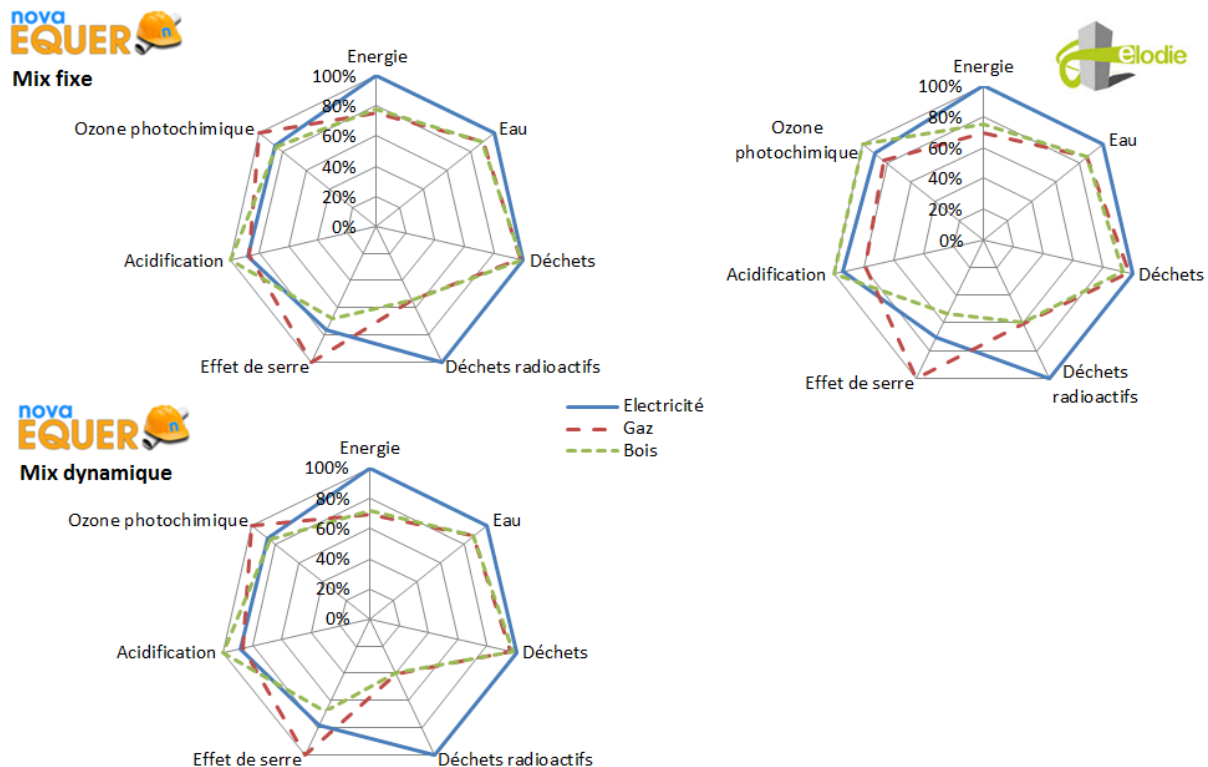


Figure 35 : Comparaison des vecteurs énergétiques avec novaEquer et Elodie en considérant un mix dynamique dans novaEquer

La Figure 36 en page 40 présente les écarts entre Elodie et novaEquer avec un mix dynamique.

La comparaison des résultats détaillés permet de constater qu'il y a peu de différences au niveau des classements de variantes si un mix fixe ou un mix dynamique est choisi. Cependant, pour tous les indicateurs sauf pour les déchets produits, les **écarts entre les deux outils** sont **plus grands**.

	Comparaison des variantes	Valeurs d'impacts (Electricité)	Valeurs d'impacts (Gaz)	Valeurs d'impacts (Bois)
	Class. 1ère	Ecarts*	Ecarts*	Ecarts*
Energie primaire totale	✓	-13%	-16%	-18%
Consommation d'eau totale	✓	-10%	-8%	-8%
Déchets éliminés	✓	-11%	-14%	-7%
Déchets radioactifs	✓	-65%	-99%	-99%
Changement climatique	✓	-7%	-12%	0%
Acidification atmosphérique	✓	-16%	-7%	-10%
Formation d'ozone photochimique	✗	-94%	-75%	-103%

* Ecart à la moyenne entre les deux outils : (novaEquer-Elodie)/moyenne (novaEquer ; Elodie)

Figure 36 : Résultats détaillés pour les variantes de vecteur énergétique avec un mix électrique dynamique dans novaEquer

Class.	1ère
Pas d'inversion de classement	Meilleure variante identique
Inversion de classement	Meilleure variante différente
Difficile de conclure	Difficile de conclure

La Figure 37 présente l'écart à la moyenne pour les variantes mix fixe et mix dynamique dans novaEquer.

(Dynamique-fixe) / Moyenne	Electricité	Gaz	Bois
Energie	-6%	-13%	-13%
Eau	-2%	-5%	-5%
Déchets	4%	2%	2%
Déchets radioactifs	-13%	-43%	-43%
Effet de serre	3%	1%	2%
Acidification	1%	0%	0%
Ozone photochimique	-1%	-1%	-1%

Figure 37 : Ecart à la moyenne entre les mix fixe et mix dynamique dans novaEquer

Avec un mix dynamique, la consommation d'énergie, la consommation d'eau, la production de déchets radioactifs et d'ozone photochimique est diminuée. Parallèlement la production de déchets et le GWP augmentent. Cela s'explique par le fait que le mix dynamique considère une **répartition par usage des productions d'électricité**, de plus un **pas de temps horaire** est pris en compte. Ainsi en **hiver**, le **mix** dynamique sera **plus carboné** puisque les centrales thermiques sont utilisées pour les pointes ; l'effet de serre et la quantité de déchets produits augmentent donc. La part du nucléaire étant moins importante à cette période, la quantité de déchets radioactifs produits et d'eau consommée diminue.

Pour les variantes gaz et bois, l'électricité est utilisée pour la ventilation, l'éclairage et l'électroménager. Ces usages sont considérés comme des usages variant de manière journalière ou hebdomadaire et sont rattachés à un mix dont la part de nucléaire est moins importante que celle du mix fixe, c'est pour cette raison que la quantité de déchets radioactifs produits diminue autant avec le mix dynamique.

Pour la variante électricité, l'ECS, qui constitue un usage de base, a un mix fortement issu du nucléaire et un peu de l'hydraulique. De même pour le chauffage, une part importante de nucléaire est considérée, elle est complétée par du thermique. Ainsi, la production de déchets radioactifs n'est pas autant diminuée que dans le cas des variantes gaz et bois.

5.2 Influence de la présence ou de l'absence de photovoltaïque

Pour ces variantes, il s'agit de comparer l'influence de la présence ou de l'absence de panneaux photovoltaïques. Les simulations portent sur la maison INCAS en béton banché I-BB.

Les valeurs de production et de **consommation**, tout comme les **mix électriques** sont disponibles aux **pas de temps annuels ou horaire** selon des outils. Plusieurs configurations sont alors possibles pour tester les outils, elles sont décrites dans la Figure 38. Les noms de ces configurations sont issues de ceux de l'article « Illustration of methodological challenges in energy and environmental assessment of buildings », [Fouquet, 2014].

Configurations	Bilan énergétique annuel	Bilan énergétique horaire
Mix électrique annuel	Cas A 	Cas C  
Mix électrique horaire		Cas B 

Figure 38 : Pas de temps possibles pour les résultats d'ACV

La Figure 39 présente les résultats obtenus avec chaque outil sur l'ensemble du cycle de vie.

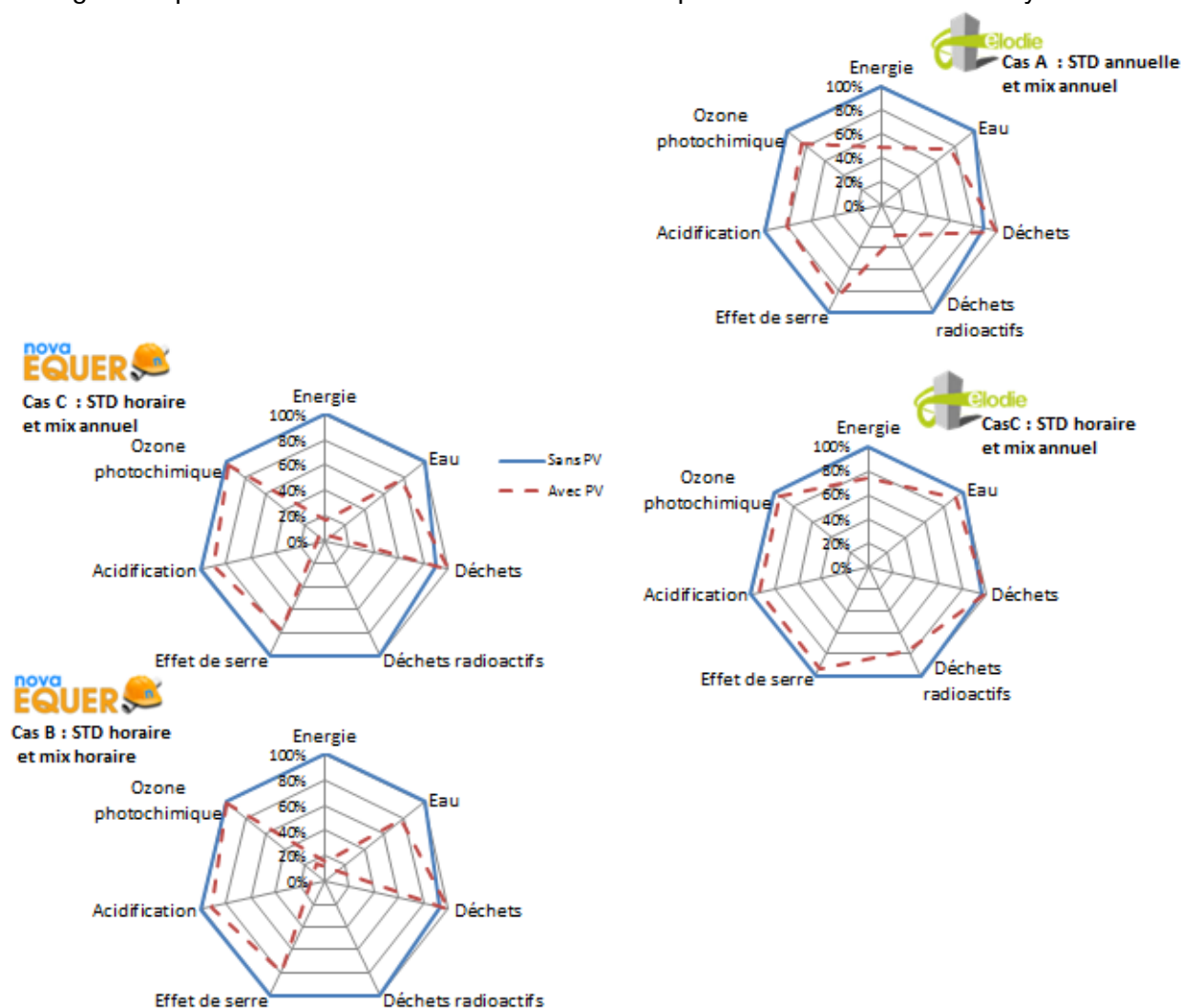


Figure 39 : Comparaison des variantes avec et sans PV dans les outils novaEquer et Elodie

Dans tous les cas, les diagrammes radars donnent **la même meilleure variante**. La variante avec PV permet d'avoir les impacts les plus faibles pour tous les indicateurs sauf pour la production de déchets.

Discussion sur l'outil novaEquer

Dans novaEquer, la forme des diagrammes radars pour le bâtiment avec PV est la même quel que soit le cas. Les impacts liés à l'énergie sont très faibles et ceux liés aux déchets radioactifs sont négatifs. Cela est lié à la **méthode des impacts évités** choisie pour cet outil.

On considère en effet que l'électricité produite par le bâtiment est de l'électricité que le réseau n'a pas eu besoin de produire. Les **impacts de l'électricité exportée** sont alors **soustraits à ceux de l'électricité importée et autoconsommée**, ce qui améliore le bilan du bâtiment.

Pour les variantes avec PV, on remarque une production de déchets radioactifs plus faible pour le cas B. Cela est lié à la prise en compte heure par heure de la production d'électricité et de la consommation pour le chauffage en mix dynamique.

Discussion sur l'outil Elodie

Dans Elodie, la forme des diagrammes radars est très différente pour les cas A et C. Cela est lié à la **méthode des coproduits** est utilisée pour cet outil. L'énergie exportée est considérée comme un service supplémentaire rendu par le bâtiment et à ce titre le **bénéfice environnemental de l'export d'énergie** ne peut **pas** être **attribué au bâtiment**. Les impacts de la production locale d'énergie sont alors affectés au prorata de l'énergie autoconsommée ; les impacts restants sont affectés au réseau.

Pour le cas A, le mix et la STD sont annuels. Comme sur l'année, la production des panneaux est supérieure à la consommation pour les postes réglementaire et l'électroménager, on considère ici que toute l'énergie est autoconsommée. C'est pour cette raison que les impacts sur l'énergie et les déchets radioactifs sont fortement diminués par rapport à la variante sans PV. Il ne reste pour la variante « avec PV », que les impacts liés aux produits de construction et aux équipements.

Pour le cas C, la STD est horaire et le mix est fixe. Les valeurs entrées pour les consommations d'énergie correspondent à celles importées du réseau ; la part autoconsommée n'entrant pas dans le bilan énergétique pour cette variante. Les impacts du champ photovoltaïque sont réduits pour correspondre uniquement au pourcentage d'électricité autoconsommée. On observe donc une diminution de la consommation d'énergie et de la production de déchets radioactifs par rapport à la variante sans photovoltaïque, puisque la part d'électricité issue du réseau est moins importante. Cette diminution reste toutefois moins importante que dans le cas A où toute la production d'électricité est couverte par les panneaux.

Pour les variantes avec PV, il y a moins de déchets produits pour le cas C ; en effet seule une partie du champ est considérée, celle correspondant à la part d'électricité autoconsommée

Comparaison des résultats données par les deux outils

Il est possible de comparer les résultats donnés par les deux outils seulement pour le cas C (mix électrique annuel et bilan énergétique horaire).

Les résultats détaillés sont donnés dans la Figure 40 en page 43.

	Valeurs d'impacts (Sans PV)	Valeurs d'impacts (Avec PV)
	Ecart*	Ecart*
Energie primaire totale	-7%	-132%
Consommation d'eau totale	-7%	-25%
Déchets éliminés	-15%	-7%
Déchets radioactifs	-54%	-224%
Changement climatique	-11%	-29%
Acidification atmosphérique	-17%	-21%
Formation d'ozone photochimique	-93%	-92%

* Ecart à la moyenne entre les deux outils (novaEquer-Elodie)/moyenne (novaEquer ; Elodie)

Figure 40 : Résultat détaillé pour les variantes avec et sans PV

Les **écarts** observés dans la Figure 40 s'expliquent par les **différences de méthodologie** présentée plus haut. Les écarts sur l'énergie et le changement climatique viennent de la prise en compte des impacts évités dans novaEquer. Dans une moindre mesure, cela peut aussi expliquer l'écart sur la consommation d'eau, l'effet de serre et l'acidification.

Pour l'indicateur de déchets produits, l'écart est lié à la taille du champ photovoltaïque considéré : champ complet dans novaEquer ou pourcentage de la surface du champ déterminée à partir de la part autoconsommée dans Elodie.

Enfin, pour la production d'ozone photochimique, les écarts sont liés aux différences sur les méthodes de calculs dans les deux bases de données.

5.3 Les variantes constructives

Pour ces variantes, il s'agit de **comparer différents modes constructifs** : maison en béton banché (I-BB), à double mur (I-DM) et à ossature bois (I-OB). Dans ce rapport, seule la variante de base est présentée ; les résultats complémentaires sont en annexe.

La Figure 41 présente les résultats obtenus avec chaque outil sur l'ensemble du cycle de vie.

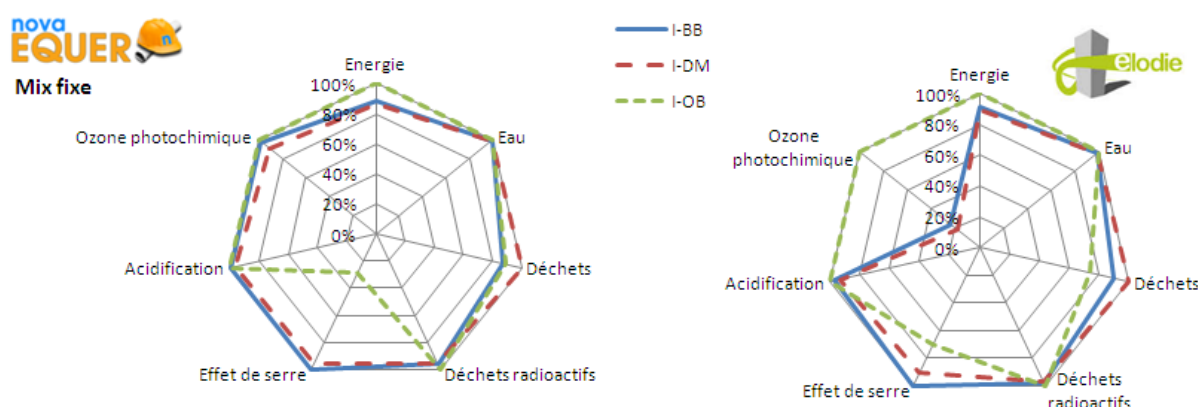


Figure 41 : Comparaison des variantes constructives avec novaEquer et Elodie

A première vue, la **reproductibilité** des résultats semble être **moins bonne** sur les variantes constructives **qu'elle ne l'était sur les variantes énergétiques**. Les principaux **écarts** sont observés sur les indicateurs de **déchets produits**, d'**effet de serre** et d'**ozone photochimique**.

Concernant la consommation d'énergie primaire, on remarque que les maisons I-BB et I-DM consomment environ 10% d'énergie en moins que la variante I-OB, et ce dans les deux outils. Cela s'explique par l'écart sur les besoins de chauffage observé entre les différents modes constructifs ; les besoins de chauffage de la maison à ossature bois sont plus élevés

que ceux des deux autres variantes constructives ; principalement à cause des incertitudes sur les choix des valeurs pour les ponts thermiques.

La maison à ossature bois est celle pour laquelle l'indicateur effet de serre est le plus faible. En effet, dans les FDES, un stockage de CO₂ est pris en compte à la croissance du bois. De même, dans novaEquer, le choix s'est porté sur l'utilisation de bois issu de forêt bien gérée et un stockage de CO₂ est pris en compte lors de sa croissance.

La Figure 42 présente les écarts entre Elodie et novaEquer pour ces variantes.

	Comparaison des variantes	Valeurs d'impacts (I-BB)	Valeurs d'impacts (I-DM)	Valeurs d'impacts (I-OB)
	Class. 1ère	Ecarts*	Ecarts*	Ecarts*
Energie primaire totale	✓	-7%	-7%	-3%
Consommation d'eau totale	✓	-7%	-7%	-7%
Déchets éliminés	✗	-15%	-12%	7%
Déchets radioactifs	✓	-54%	-52%	-52%
Changement climatique	✓	-11%	-5%	-93%
Acidification atmosphérique	✓	-17%	-17%	-20%
Formation d'ozone photochimique	✗	-93%	-78%	-167%

* Ecart à la moyenne entre les deux outils : (novaEquer-Elodie)/moyenne (novaEquer ; Elodie)

Figure 42 : Résultat détaillé pour les variantes constructives

Class.	1ère
Pas d'inversion de classement	Meilleure variante identique
Inversion de classement	Meilleure variante différente
Difficile de conclure	Difficile de conclure

Quel que soit l'outil utilisé, il n'est pas possible de dire qu'une variante est meilleure qu'une autre. En effet, en fonction des indicateurs les classements varient et pour certains indicateurs, il n'est pas possible de déterminer le classement exact des différentes variantes.

Dans les paragraphes suivants, un commentaire est fait pour chaque indicateur afin d'expliquer les écarts observés.

➤ **Energie** : la consommation d'énergie est toujours supérieure avec l'outil Elodie. L'électricité est en effet responsable d'une consommation plus importante d'énergie dans l'outil Elodie comme le montre la Figure 33, en page 37. L'écart à la moyenne entre les outils est plus faible pour la maison I-OB. Cela peut s'expliquer par un **écart entre les deux bases** de données. En effet, pour certains matériaux de la maison I-OB, la consommation d'énergie est plus importante pour les données Ecoinvent, comme le montre la Figure 43. Cela ne se remarque pas autant sur les matériaux des autres maisons.

Ecart relatif (Ecoinvent-FDES)/FDES	GWP100	acidification	énergie	eau	déchets	O3-smog	déchets rad.
Bois lourd	130%	-57%	13%	-37%	16%	-81%	-58%
Fibre de bois	139%	-51%	-23%	-65%	17%	-89%	-74%
Fibre de ciment cellulose	-22%	-48%	-35%	17%	-18%	-100%	22%
Laine de bois	71%	-24%	-5%	30%	1%	-52%	51%
Panneau OSB	193%	14%	70%	163%	102%	-90%	30%
BA 10	120%	123%	95%	60%	4%	-30%	47%

Figure 43 : Ecart relatif entre les bases de données pour certains matériaux de I-OB

➤ **Eau** : l'écart entre les outils novaEquer et Elodie ne varie pas d'un mode constructif à l'autre. En observant les répartitions par lots pour cet indicateur, on constate que les principaux contributeurs consommateurs d'eau sont l'eau et l'énergie. Or pour l'électricité la part d'eau consommée est plus importante dans Elodie, voir la Figure 33 en page 37. C'est pour cette raison que globalement, la consommation d'eau est plus importante dans Elodie.

➤ **Déchets éliminés** : sur cet indicateur, on observe une **inversion de classement**. Dans Elodie, la maison I-OB est celle qui produit le moins de déchets alors que dans NovaEquer, cette maison produit plus de déchets que I-BB. Il s'est avéré que cet écart était lié à la **différence de densité de la laine de bois** dans les deux outils. Dans novaEquer, la densité est transmise depuis Pléiades et vaut 160 kg/m^3 ; conformément aux données fournies par le CEA sur les isolants utilisés dans la maison à ossature bois. Dans Elodie, on peut lire dans les caractéristiques de la laine de bois choisie que la densité est de 50 kg/m^3 . Or le volume de laine de bois défini dans les deux outils étant identique, le poids est beaucoup plus important dans novaEquer. Lorsque les densités prises en compte dans les deux outils sont les mêmes, il n'y a plus d'inversion de classement comme le montre l'une des sous-variantes en annexe.

Remarque :

- L'harmonisation sur le recyclage des bétons a conduit à inverser les tendances jusqu'alors observées ; la quantité de déchets produit est désormais plus importante dans l'outil Elodie pour les lots contenant du béton. C'est ce qu'on peut voir sur la Figure 44. Sans harmonisation sur les déchets, la part de déchets était plus importante dans novaEquer, comme le montre l'une des sous-variantes en annexe.

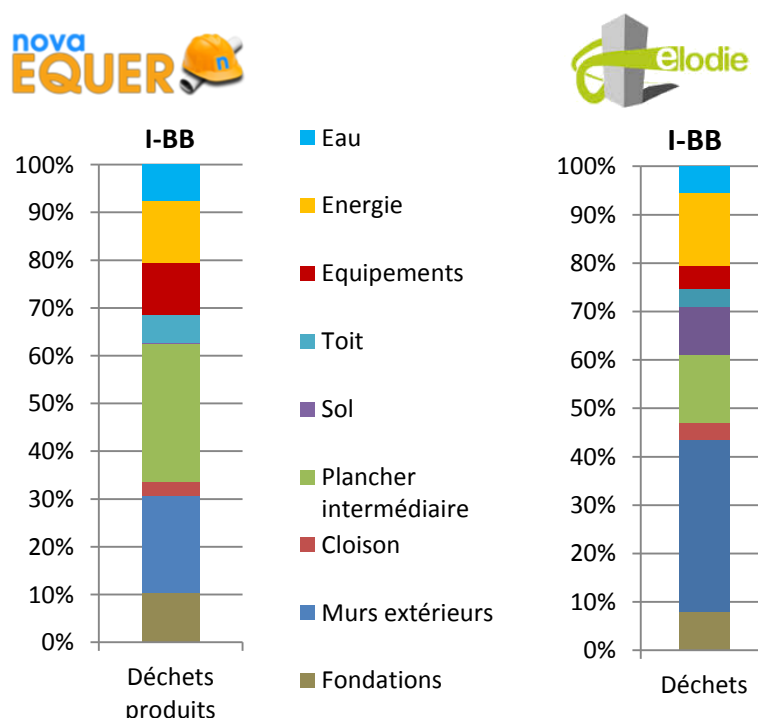


Figure 44 : Répartition par lots pour l'indicateur de production de déchets pour la maison I-BB

➤ **Déchets radioactifs** : les écarts entre les outils sont assez importants et c'est pour l'outil Elodie que la quantité de déchets radioactifs produits est la plus importante. Comme le montrent les graphiques de répartition par lots (Figure 29, page 35), la production de déchets radioactifs est liée principalement au contributeur énergie. Or pour le vecteur électricité, la quantité de déchets radioactifs produit est plus importante dans les DES d'Elodie. L'écart sur cet indicateur s'explique donc par un **écart sur les bases de données**.

➤ **Effet de serre** : on observe un écart important sur cet indicateur pour la maison à ossature bois. Dans novaEquer, on a considéré que le bois était issu de forêts bien gérées. Cela revient à prendre en compte un stockage de CO₂ biogénique dans le bois lors de sa croissance. Une variante pour laquelle le **carbone biogénique** n'a pas été pris en compte dans novaEquer est présentée en annexe. Pour celle-ci, la courbe de I-OB rejoint celles de I-DM et de I-BB pour l'indicateur effet de serre. Cette variante permet de constater que dans les FDES, l'impact lié à l'effet de serre semble être une valeur intermédiaire entre les variantes bois certifié et bois non certifié de novaEquer.

➤ **Acidification** : les écarts entre les deux outils sont assez faibles. Dans tous les cas, les impacts liés à l'acidification sont plus élevés dans l'outil Elodie. Cela s'explique car pour presque tous les matériaux ainsi que pour le vecteur électricité, les impacts liés à l'acidification sont plus importants dans Elodie, comme le montre les Figure 33 et Figure 34 en pages 37 et 38. L'écart est donc lié aux **bases de données**. Comme indiqué dans les variantes de vecteur énergétique, les écarts sur cet indicateur sont à nuancer.

➤ **Formation d'ozone photochimique** : l'écart important s'explique par la différence de **méthode de calcul** entre Ecoinvent et la norme NF P01-010 utilisée dans les FDES pour cet indicateur. Cependant, comme nous l'avons vu pour les variantes énergétiques, malgré l'écart important et la non reproductibilité des résultats, les **normalisations** montrent que l'impact en habitant-an est toujours le plus faible pour cet indicateur. Cela permet de **relativiser son importance**.

5.4 Conclusion sur la reproductibilité des résultats

Les études d'ACV comparatives réalisées dans le cadre de ce projet ont permis de mettre en évidence les sources probables des écarts observées entre les outils novaEquer et Elodie. La Figure 45 regroupe les remarques faites concernant la reproductibilité pour les indicateurs environnementaux. Pour rappel, la normalisation permet une hiérarchisation des indicateurs.

	Ecart entre les outils	Inversion de classement	Reproductibilité	Importance relative - normalisation
Energie primaire totale	faibles		✓ Bonne reproductibilité	++ grande
Consommation d'eau totale	faibles	incertain	✓ Bonne reproductibilité	++ grande
Déchets éliminés	+ moyens	résolu si données harmonisées	✓ Assez bonne reproductibilité	+ moyenne
Déchets radioactifs	+++ grands	incertain	✗ Faible reproductibilité	++ grande
Changement climatique	+ moyens		✓ Assez bonne reproductibilité	+ moyenne
Acidification atmosphérique	+ moyens	incertain	✓ Assez bonne reproductibilité	+ moyenne
Formation d'ozone photochimique	+++ grands	dans tous les cas	✗ Pas de reproductibilité	faible

Figure 45 : Tableau récapitulatif

Les **origines des écarts** ont pu être confirmées par ces études :

➤ Les **méthodologies** et partis pris lors de la création des outils peuvent aussi expliquer des écarts au niveau des résultats. Cela a notamment pu être constaté lors de l'étude de l'influence de la présence de panneaux photovoltaïques. La méthode des impacts évités choisie dans l'outil novaEquer donne des résultats différents de celle des coproduits utilisée dans Elodie.

➤ Les différences de **méthodes de calcul pour les indicateurs environnementaux** aboutissent à des divergences au niveau des résultats comme cela a pu être constaté pour l'indicateur de production d'ozone photochimique.

➤ Les **bases de données environnementales** sont aussi à l'origine d'écarts. Malgré l'harmonisation des bases de données sur certains composants, les écarts entre les bases de données conduisent parfois à des écarts sur les résultats donnés par les deux outils. En effet, pour certains composants, l'harmonisation n'a pu être réalisée, les phases du cycle de vie et les sous-constituants des composants semblant être identiques dans les deux bases.

D'autre part, des **incertitudes** résident au niveau de la saisie de données dans l'un ou l'autre des outils.

➤ Les valeurs des **métrés** saisis dans Elodie et novaEquer ne peuvent pas toujours être scrupuleusement identiques (données transmises en m³ ou en kg dans novaEquer et à saisir en m² dans Elodie alors que l'épaisseur de paroi considérée n'est pas précisée).

➤ Certains paramètres comme le surplus pour le chantier ou la distance de transport sont fixés par chaque industriel dans les FDES alors que ces données sont renseignées par l'utilisateur pour l'ensemble des matériaux dans novaEquer.

Dans **la plupart des cas**, les écarts entre outils semblent être liés à des **écarts** sur les **bases de données**. Il serait donc intéressant de pouvoir déterminer les provenances de ces écarts à l'intérieur des bases de données. Des analyses de contributions pourraient par exemple être menées pour déterminer quel sous-constituant est responsable des plus grands écarts. Ce type de méthodologie est applicable à la base de données Ecoinvent puisque toutes les données sont liées entre elles. Cependant, il n'est pas possible de réaliser la même démarche avec les FDES pour lesquelles seules les valeurs d'impacts sont disponibles. Le lien vers les données sources, sur lesquelles se sont basés les industriels créateurs des FDES, n'est en effet pas conservé.

Nota Bene

Les résultats d'ACV comparatives sont donnés pour quelques simulations dans ce chapitre. Dans tous les cas, les résultats donnés par novaEquer et Elodie, pour chaque indicateur environnemental, sont comparés afin d'étudier la reproductibilité des résultats.

Les principaux écarts observés sont liés aux différences sur les bases de données (malgré les harmonisations réalisées), aux méthodologies variant d'un outil à l'autre ou encore aux différentes méthodes de calcul des indicateurs environnementaux.

Les indicateurs de déchets radioactifs et de production d'ozone photochimique se sont révélés être les moins reproductibles.

6 Conclusion

Ce projet de fin d'étude, réalisé au centre d'efficacité énergétique des systèmes, avait pour objectif la réalisation d'analyses de cycle de vie sur les maisons passives de la plateforme INCAS avec les dernières versions des outils d'ACV novaEquer et Elodie. Il s'agissait d'étudier la reproductibilité des résultats donnés par ces deux outils, et ce, dans le cadre de la tâche 4.1 du projet de recherche BENEFIG.

Pour ce faire, la modélisation des maisons dans le logiciel Pléiades + COMFIE a été approfondie. Des hypothèses de STD et d'ACV ont été posées ; elles contribuent à définir les limites de l'étude d'ACV. Afin de déterminer de manière précise l'origine des écarts, un travail d'harmonisation des données d'entrée a été réalisé. Ainsi, certaines données sur les bâtiments ont d'abord été modifiées : choix de surfaces identiques pour les trois maisons, modification des épaisseurs de matériaux pour avoir des résistances thermiques équivalentes au niveau de l'isolant... Les matériaux des bases de données ont aussi été harmonisés dans la mesure du possible. Enfin les entrées des logiciels ont été harmonisées à chaque fois que les interfaces utilisateur des outils le permettaient.

Les études de reproductibilité menées ont permis de faire ressortir des divergences entre les deux outils liées aussi bien aux méthodologies inhérentes aux outils, qu'à des différences entre les bases de données environnementales. Pour certains matériaux, les valeurs d'impacts environnementaux sont très différents entre les bases ; d'autre part, les méthodes de calcul des indicateurs environnementaux peuvent varier d'un outil à l'autre. Enfin, malgré l'attention portée à la saisie des données dans les outils, des incertitudes demeurent quant à leur homogénéité, les interfaces ne permettant pas toujours de décrire les mêmes choses.

Les variantes étudiées ont permis de mettre en avant des problèmes de reproductibilité pour certains indicateurs environnementaux. C'est le cas de l'indicateur de potentiel de formation d'ozone photochimique ou de celui de production de déchets radioactifs pour lesquels les écarts en termes de valeurs d'impacts donnés par les outils sont importants. Pour ces indicateurs, les deux outils ne classent généralement pas de la même manière les variantes étudiées.

Afin de confirmer les problèmes et écarts observés, des simulations similaires à celles effectuées dans ce projet seront réalisées sur les mêmes bâtiments par un autre partenaire du projet BENEFIG, le CSTB. Cela complètera la sous-tâche 4.1 en permettant la comparaison des résultats d'ACV faits par deux utilisateurs distincts sur un même projet.

Dans le but de cerner au mieux les origines des incertitudes, il serait également intéressant d'étudier les impacts d'un grand nombre de paramètres (données d'entrée, méthode de calcul...) sur les résultats d'ACV obtenus.

Le travail réalisé répond aux objectifs initiaux puisque les résultats de cette étude ont permis de mettre en évidence des écarts entre les outils et de déterminer leurs origines probables. Suite à cela, des recommandations pourront être émises afin d'augmenter la reproductibilité des ACV réalisées avec novaEquer et Elodie. Or, il est essentiel de rendre fiables les résultats d'ACV. Cela contribue à augmenter la confiance des utilisateurs dans ces outils d'évaluation de la performance environnementale des bâtiments qui sont amenés à être de plus en plus utilisés dans le contexte de crise écologique actuel.

Sur le plan personnel, ce stage a été très intéressant et enrichissant. Il m'a permis d'une part de découvrir le fonctionnement d'un centre de recherche reconnu, et de compléter ma connaissance du milieu professionnel dans lequel je suis susceptible de travailler. D'autre part, j'ai pu découvrir la démarche d'analyse de cycle de vie qui requiert beaucoup de rigueur au niveau du choix des hypothèses, tant les liens sont étroits entre les décisions prises et les résultats obtenus. Le bilan de ce stage est donc très positif et je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe ETB et tout particulièrement Bruno PEUPORTIER pour les bons conseils et la disponibilité tout au long du projet.

Bibliographie

1. **ADEME.** *Climat, air et énergie; Chiffres-clés.* Edition 2013.
2. **Service de l'Observation et Statistiques, Commissariat général au développement durable.** *355 millions de tonnes de déchets produits en France en 2010.* Janvier 2013. n°385.
3. **ANR .** *Projet BENEFIS - Bilan ENergétique et Environnemental Flable Simple et reproductible des bâtiments.* 2011. ANR-GUI-AAP-04-Doc Scientifique 2011.
4. **Olivier Jolliet, Myriam Saadé, Pierre Grettaz, Shanna Shaked.** *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan. 2e édition mise à jour et augmentée.* Lausanne : Presses Polytechniques et universitaire, Collection gérer l'environnement, 2010. ISBN : 978-2-88074-886-9.
5. **Bruno Peuportier, Bernd Polster.** *Manuel d'utilisation : Logiciel Equer, Simulation du cycle de vie des bâtiments.* s.l. : Ecole des Mines de Paris, Centre d'énergétique.
6. **IZUBA Energies.** *Documentation Equer, Manuel. IZUBA Energies.* [En ligne] <http://docs.izuba.fr/fr/wakka.php?wiki=IntroductionEQUER>.
7. **ISO 14 040.** *Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadres.* 2006.
8. **IES, (Institut for Environment and Sustainability) et JRC European Commission (Joint Research Center).** *ILCD Handbook - International Reference Life Cycle Data System - Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators.* 2010. EUR 24586 EU.
9. **Université, de Valenciennes.** *Méthodologie de l'analyse du cycle de vie.* [En ligne] http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_110_2-1.html.
10. **Bruno, Peuportier.** *Eco-conception des bâtiments et des quartiers.* s.l. : Presse de l'Ecole des Mines, 2008.
11. **Ecoinvent.** *Ecoinvent Center. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.* [En ligne] <http://www.ecoinvent.org/>.
12. **INIES.** *Base de données INIES. Base nationale française de références sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages.* [En ligne] <http://www.base-inies.fr/Inies/default.aspx>.
13. **Bruno Peuportier, Isabelle Blanc-Sommereux.** *Manuel des utilisateurs : COMFIE passive solar design tool for multizone buildings.* s.l. : Ecole des Mines de Paris, Centre d'énergétique, 1994.
14. **CSTB.** *Manuel d'utilisation de logiciel Elodie V2.* 2013. DEE/ENV 1.042.
15. **Jérôme Deshayes.** *Projet ANR Habisol 2008 - SIMINTHEC - L1.1 - Plateforme INCAS - description des bâtiments tests et des éléments/systèmes contenus.* 2008. Confidentiel.
16. **Fabio Munaretto.** *Etude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments.* s.l. : Doctorat ParisTech, 2014.

17. **CSTB**. Réglementation thermique 2012. *Règles Th-U, Fascicule 5 : Ponts thermiques*. Mars 2012.
18. —. Méthode de calcul Th-BCE 2012. *Annexe à l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE*.
19. **Bruno Peuportier**. *Rayonnement solaire*. [PowerPoint] s.l. : Support de cours dans le cadre du module sur la thermique du bâtiment dispensé à l'Ecole des Mines de Paris.
20. **Guinée et al.** *LCA - An operational guide to the ISO-standards, Part 2b : Operationel annex*. 2001.
21. **AFNOR**. *NF P01-010, Qualité environnementale des produits de construction, Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction*. 2004. ISSN 0335-3931.
22. **Grégory, Herfray**. *Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers*. s.l. : Doctorat ParisTech, 2011.
23. **ARMINES**. *2012-2013 Au coeur de la recherche et de l'innovation ouverte*. 2013.

Sommaire des annexes

Annexe 1 : Calcul des indicateurs environnementaux dans Elodie et novaEquer	3
Annexe 2 : Mise à jour de la base de données de novaEquer	18
Annexe 3 : Zonage thermique des maisons INCAS	20
Annexe 4 : Composition des parois des trois maisons.....	21
Annexe 5 : Calcul du nombre d'adulte équivalent habitants les maisons INCAS	27
Annexe 6 : Modélisation des ventilations dans Pléiades + COMFIE	28
Annexe 7 : Création du fichier météo pour l'année 2013	31
Annexe 8 : Calcul des besoins d'ECS	34
Annexe 9 : Résultats donnés par Solo 2000 pour le dimensionnement du CESI	35
Annexe 10 : Calcul de la consommation des ventilateurs	36
Annexe 11 : Correspondances entre les matériaux en STD et en ACV	37
Annexe 12 : Comparaison et harmonisation des bases de données.....	40
Annexe 13 : Résultats des variantes constructives	45

Présentation de l'entreprise d'accueil

Le projet de fin d'étude s'est déroulé dans l'équipe ETB du CES ; l'un des centres de recherche de l'Ecole des Mines de Paris et géré par ARMINES, une structure privée.



ARMINES est une association liée à de nombreuses grandes écoles françaises, dont le réseau des Ecoles des Mines et l'Ecole Polytechnique. Les établissements publics d'enseignement supérieur et de recherche confient leurs activités de recherche à cette institution privée de recherche contractuelle qui s'occupe alors de la partie administrative et économique des différents contrats signés entre les centres de recherche et les industriels.

Près de 550 salariés sont employés par ARMINES ; environ 23% de ces salariés sont doctorants (23). En 2012, l'activité d'ARMINES représentait 47M€. 62% du chiffre d'affaire a été réalisé grâce au partenariat avec l'Ecole des Mines de Paris.

L'Ecole des Mines de Paris est l'une plus ancienne d'ingénieur de France. Elle fût créée par Louis XVI en 1783 afin de former des « directeurs intelligents » pour les mines du royaume. Cette école est membre du réseau des grandes écoles **ParisTech**.

Les travaux de recherche de l'école s'articulent autour de cinq grandes thématiques (Sciences de la terre et de l'environnement, Energétique et procédés, Mécanique et matériaux, Mathématiques et systèmes, Economie management et société) correspondant à cinq départements de recherche ; eux-mêmes structurés en 18 centres de recherche.

Le centre de recherche dans lequel s'est déroulé le stage est le CES : **Centre d'Efficacité Energétique des Systèmes**, situé à Palaiseau et à Paris. Il s'agit d'un des centres de recherche de l'Ecole des Mines de Paris, rattaché à la thématique « Energétique et procédés ». Une quarantaine de personnes travaillent dans ce centre, dirigé par Maroun NEMER, qui compte cinq groupes de recherche.

Les groupes de recherche sont répartis de la manière suivante :

- ETB : Eco-conception et Thermique du Bâtiment
- MDE : Maîtrise de la Demande en Energie
- TDS : Thermodynamique Des Systèmes
- SYSTHERM : SYSTèmes THERMiques
- TGLP : Transferts Gaz Liquides et Procédés

Le groupe ETB, **Eco-conception et Thermique du Bâtiment** est dirigé par Bruno PEUPORTIER. Il est constitué d'une dizaine de personnes : deux encadrants, six doctorants, un ingénieur de recherche. Lors du projet de fin d'étude, trois autres stagiaires faisaient aussi partis de l'équipe. Les activités de ce groupe de recherche concernent l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et l'analyse du cycle de vie appliquées aux bâtiments et aux quartiers.

Suite aux travaux de Bruno PEUPORTIER, des outils de simulation thermique dynamique et d'analyse de cycle de vie (COMFIE et EQUER), destinés aux acteurs du bâtiment, sont commercialisés par la société IZUBA Energies. Ces outils sont constamment enrichis par différents travaux de recherche.