
EXTENSION DE L'ÉCOLE IVRY LEVASSOR

Rapport ACV systèmes constructifs

Version 3.4 du 30/04/2020

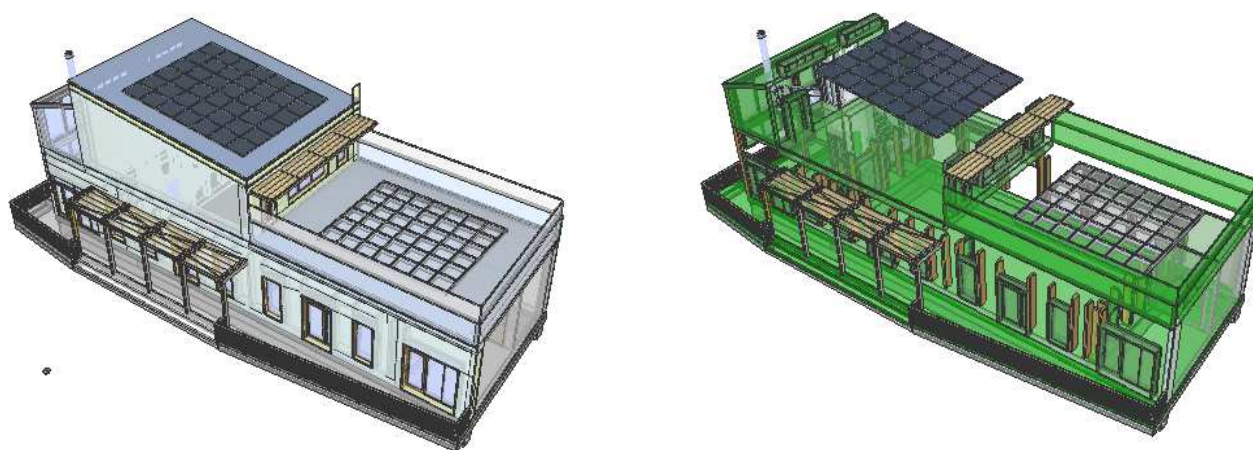


Figure 1: Vue du bâtiment colorée selon le contenu en bois et matériaux de ses éléments constructifs

Contenu

EXTENSION de l'école Ivry Levassor	1
1. Méthodologie et moyens employés pour l'analyse en cycle de vie.....	4
1.1. Domaine d'application	4
1.2. Périmètres de calcul	4
1.3. Logiciel	4
1.4. Déclarations environnementales françaises	4
1.5. Déclarations environnementales étrangères	5
1.6. Principales différences entre déclarations environnementales	5
1.7. Méthodologie de modalisation de l'usage de produits réutilisés	6
2. Comparaison de variantes constructives	8
2.1. Présentation sommaire du projet	8
2.2. Récapitulatif des variantes constructives étudiées	8
2.3. Principaux paramètres du projet.....	9
3. Composition des principales parois et éléments constructifs	10
3.1. Fondations.....	10
3.1.1. Fondations semi profondes en béton.....	10
3.1.2. Fondations vissées en acier	10
3.2. Structure porteuse.....	12
3.3. Dalle du RDC	13
3.4. Dalle du R+1.....	14
3.5. Toiture	18
3.6. Murs d'enveloppe	21
3.7. Mur mitoyen RDC.....	25
3.8. Fenêtres	26
3.9. Escalier	27
4. Maquette numérique du bâtiment	28
5. Analyse en cycle de vie à l'échelle du bâtiment.....	29
5.1. Label « Bâtiment biosourcés »	29
5.2. Répartition des GES entre matériaux et équipements.....	29
5.3. Comparaison des émissions de GES et de consommation d'énergie grise entre les différentes variantes des bâtiments	30
5.4. Type de ressources mobilisées par variantes constructives (en volume et en poids).....	32
6. Consommations énergétiques et Label E+C-.....	33
6.1. Bilan global E+C- à l'échelle du site	33
6.2. Bilan E+C- par lots constructifs (à l'échelle du site)	34
Conclusion	35
7. Annexe	37
7.1. ACV simplifiée du panneau alvéolaire IPAC®	37
7.2. ACV simplifiée du lattis métallique nervuré - Nergalto® NGSE (doublage papier siliconé)	39
7.3. Comparaison de solutions constructives pour certains éléments de façade	40
7.3.1. Comparaison de bardages bois	40
7.3.2. Comparaison d'une paroi isolée en paille avec parements en bois ou en plâtre gros.....	41
7.3.3. Bardage pin douglas+ Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV + Lambris	41
7.3.4. Bardage bois Mélèze + Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV + Lambris.....	41
7.3.5. End. plâtre + Lattis métal + Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV + Lambris.....	41
7.4. Couplage ACV Dynamique / Simulation Thermique Dynamique / Production énergétique dynamique	44
7.4.1. Le cycle « particulier » du carbone dans les matériaux d'origine végétale.	45
7.4.2. Valorisation dynamique des atouts environnementaux du réemploi.....	45
7.4.3. Evitements d'émissions de GES procurés par les équipements de production locale d'énergie	46
7.4.4. Variabilité temporelle du PRG de chaque type de gaz à effet de serre.....	47
7.4.5. Conclusion.....	47

Objet

Cette note a pour but de faire une analyse en cycle de vie comparative de solutions constructives applicables à l'opération d'extension de l'école d'Ivry-Levassor.

Contexte

Les émissions de GES liées à la fabrication des bétons ont un poids important à l'échelle d'un bâtiment.

Glossaire

Acronyme	Signification	Contexte et explications
ACV	Analyse en cycle de vie	
BCD	Bibliothèque et Centre Documentaire	
DEC	Données Environnementales Conventionnelles	Déclaration environnementale française d'utilisation obligatoire pour estimer les impacts liés aux consommations d'énergie et aux services.
DEP	DEP - Déclaration Environnementale de Produit	Déclaration environnementale française conforme à la norme EN 15804 et son complément national.
DVC	Durée de Vie Corrigée	Durée de vie d'un matériau et équipement corrigée par le responsable ACV selon les contraintes du projet.
DVT	Durée de Vie Typique	Durée de vie d'un matériau et équipement fixée selon le fabricant et conforme aux recommandations du comité technique INIES.
DVP	Durée de Vie Prescrite	La DVP est la durée de vie qui est utilisée à l'échelle d'un bâtiment.
E+C-	Label Energie Carbone	Label français destiné à contribuer à réduire les impacts environnementaux des bâtiments. Il préfigure la future réglementation environnementale RE2020.
EPD	Environmental Product Declaration	Déclaration environnementale généralement Européenne de produits de construction ou équipements conforme à la norme EN 15804.
FDES	Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire.	Déclaration environnementale française de produits de construction : - Historiquement conforme à la norme NF P 01-010 qui est désormais obsolète - Souvent considérée comme synonyme de DEP.
MDEGD	Module de Donnée Environnementale Générique par Défaut	Déclaration environnementale française simplifiée de produits de construction ou équipements employée dans le cadre du label E+C-.
PEP	Profils Environnementaux de Produits	Déclaration environnementale française d'équipements.
RE 2020	Réglementation Environnementale 2020	Réglementation française en cours d'élaboration qui devrait remplacer la RT 2012 et intégrer en sus la prise en compte des impacts environnementaux de l'ensemble du cycle de vie des bâtiments.
UE	Union Européenne	

Sources

Label E+C-	Site officiel d'information sur le label E+C-	lien
	Référentiel « Énergie - Carbone » - Méthode d'évaluation	lien
	Référentiel « Énergie - Carbone » - Niveaux de performance	lien
INIES	Base de données de référence des données environnementales à employer selon le référentiel E+C-	lien
EPD On Line	Base de données Allemande contenant des déclarations environnementales de produits de construction et d'équipements.	lien
ÖKOBAUDAT	Base de données Allemande contenant des données environnementales de produits de construction et d'équipements.	lien
ECOINVENT	Base de données Suisse et considérée comme étant une référence mondiale contenant des inventaires de cycle de vie.	lien

1. Méthodologie et moyens employés pour l'analyse en cycle de vie

1.1. Domaine d'application

Les ACV s'appliquent habituellement aux opérations de construction de bâtiments neufs composés de matériaux neufs ou / et recyclés. Nous avons étendu l'ACV aux matériaux réemployés.

1.2. Périmètres de calcul

Le périmètre retenu est celui du bâtiment pour une durée de vie prescrite (DVP) de 50 ans.

1.3. Logiciel

Le logiciel COCON-BIM a été utilisé. Il s'appuie prioritairement sur des données françaises et si nécessaire étrangères.

1.4. Déclarations environnementales françaises

Plusieurs types de données environnementales sont disponibles en France via le site de la base de données INIES.

Concernant les matériaux et équipements on y dispose de :

- données individuelles à utiliser prioritairement,
- données collectives,
- données génériques par défaut (MDEGD), utilisée en l'absence de données spécifiques ou collectives qui sont affectées d'une pénalité (indiquée dans les fiches) :
 - de 30% minimum, appliquée à la moyenne des fiches individuellement ou collectives existantes ;
 - de 100% lorsqu'il n'existe pas de fiche et qu'une ACV simplifiée est appliquée à partir de données ECOINVENT.

Concernant les énergies et les services (fourniture d'eau potable, production ou consommation d'électricité, etc.) associés à l'usage de bâtiment(s) les données conventionnelles sont d'utilisation obligatoire pour le label E+C-.

NB 1 : En France, contrairement aux autres pays de l'UE, les déclarations environnementales contiennent des informations au niveau de l'ensemble du cycle de vie du matériau ou de l'équipement. Le déclarant y estime donc les impacts liés à une mise en œuvre et une vie en œuvre standard considérées comme représentatives de la réalité.

NB 2 : En France, la majorité des acteurs de l'ACV emploient indifféremment les termes de FDES et de DEP..

Figure 2: Données environnementales relatives aux matériaux

Type de document	Auteur	Remarque
FDES / DEP¹		
Individuelles	Fabricant	A privilégier lorsque disponibles
Collectives	Syndicat professionnel	Généralement disponibles pour les matériaux génériques
MDEGD²	Ministère	Données affectées d'un malus lié à leur imprécision.

Figure 3: Données environnementales relatives aux équipements

Type de document	Auteur	Remarque
PEP³		
Individuels	Fabricant	A privilégier lorsque disponibles
Collectifs	Syndicat professionnel	Généralement disponibles pour les équipements génériques
MDEGD⁴	Ministère	Données affectées d'un malus lié à leur imprécision.

¹ FDES – Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire, DEP - Déclaration Environnementale de Produit. Ces deux termes sont employés indifféremment dans le cadre du label E+C-.

² MDEGD - Module de Donnée Environnementale Générique par Défaut

³ PEP Profils Environnementaux de Produits.

⁴ MDEGD - Module de Donnée Environnementale Générique par Défaut.

Figure 4: Données environnementales relatives aux énergies et aux services

Type de document	Auteur	Remarque
DEC ⁵	Ministère	Utilisation obligatoire

1.5. Déclarations environnementales étrangères

Des données environnementales sont disponibles à l'étranger. Dans le secteur du bâtiment l'immense majorité sont disponibles sous forme de EPD⁶.

NB : Contrairement à la France dans la majorité des autres pays de l'UE, seules les phases du cycle de vie maîtrisées par le fabricant (production du matériau ou de l'équipement) ou par sa filière (fin de vie) sont prises en compte dans l'ACV.

1.6. Principales différences entre déclarations environnementales.

Les principales différences entre les déclarations environnementales françaises et étrangères se situent au niveau :

- du périmètre de l'ACV,
- de la précision de l'ACV ;
- du détail de prise en compte des impacts durant le cycle de vie.

On notera (Figure 5) qu'en France les déclarations environnementales contiennent systématiquement des informations pour le total du cycle de vie alors que ce n'est généralement pas le cas dans les autres pays de l'UE.

Dans le secteur du bâtiment on distingue les phases du cycle de vie suivantes :

- fabrication (A1 à A3)
- construction (A4 à A5)
- usage – vie en œuvre (B1 à B7)
- fin de vie (C1 à C4)
- bénéfices et charges au-delà des frontières du système (D).

Figure 5: Comparaison des différents types de déclarations environnementales en France et dans l'UE

Type	Périmètre	Pénalité	Pays	Total cycle de vie	A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	D
EPD	Individuelles ou collectives		UE		X			X	
FDES	Individuelles ou collectives		FR	X					
DEP	Individuelles ou collectives		FR	X	X	X	X	X	X
PEP	Individuelles ou collectives		FR	X	X	X	X	X	X
MDEGD	Génériques par défaut	30 à 100%	FR	X					
DEC	Conventionnelles		FR	X					

⁵ DEC – Données Environnementales Conventionnelles.

⁶ EPD – Environmental Product Declaration

1.7. Méthodologie de modalisation de l'usage de produits réutilisés.

Les déclarations environnementales de produits de construction ou équipements portent aujourd'hui uniquement sur des matériaux neufs.

Il arrive que certains matériaux neufs soient constitués de matières premières recyclées. C'est le cas par exemple de la ouate de cellulose dont la DEP n°7882 est disponible sur le site de INIES sous le titre « Isolant cellulose « en vrac » en soufflage en combles en toiture sous rampants ».

L'ACV d'un matériau basé sur des matières premières recyclées est réalisé en :

- ignorant les impacts de la production de la matière première initiale (par exemple pour la ouate de cellulose, les impacts liés à la production de papier) ;
- intégrant les impacts des opérations nécessaires au recyclage (par exemple les impacts liés à la collecte et au traitement des papiers usagés pour les transformer en ouate de cellulose).

Dans le cadre de ce projet, nous avons estimé l'impact environnemental du réemploi de matériaux pour lesquels il n'existe pas à ce jour de déclarations environnementales car :

- cette activité est encore très modeste dans l'organisation actuelle du secteur du bâtiment,
- les scénarii de réemploi de matériaux sont éminemment variables.

Principe :

Dans le cas où un produit de construction est réutilisé, les impacts environnementaux de celui-ci peuvent être calculés :

- en prenant en compte :
 - o Les évitements liés à la production de son équivalent neuf. Exemple : réutiliser une fenêtre ancienne évite d'en produire une neuve.
 - o Les impacts liés à la mise en œuvre et à l'entretien du produit réutilisé. Exemple : poser une fenêtre issue du réemploi nécessite de la nettoyer, de la poncer, de lui fabriquer un châssis, de la poser, etc. ;
 - o Un éventuel prolongement de durée de vie du produit. Exemple : une fenêtre bois dont la DVT est par défaut de 30 ans peut être réemployée et voir sa DVC passer à 50 ans.
- en négligeant :
 - o Les conditions réelles au moment de production du produit réutilisé car :
 - Il est difficile de les reconstituer a posteriori (le mix énergétique du pays, les technologies employées sont différents du contexte actuel).
 - Les impacts environnementaux des phases de fabrication (A1 à A3), de construction (A4 à A5) et d'usage – vie en œuvre (B1 à B7) puisque ceux-ci sont dans le passé.
- en considérant comme neutre la fin de vie puisque celle-ci est relativement insensible à la réutilisation. Exemple une fenêtre réutilisée sera de toute façon soumise au passage du temps et aura donc une fin de vie.

A partir de cela, pour une DVP il est donc possible de modéliser de manière satisfaisante le réemploi d'un produit de construction en :

- prenant en compte sa date initiale de fabrication
- allongeant si nécessaire sa durée de vie (sa DVC dans ce cas supérieure à sa DVT).

Figure 6: Comparaison d'impacts de fenêtres neuves ou réutilisées

		Décennies																	
		1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100						
Scénario		Durée de vie prescrite au bâtiment (DVP = 50 ans)																	
Neuf + Neuf	Fenêtre	Fenêtre neuve (DVT = 30 ans)					Fenêtre neuve (DVT = 30 ans)												
	Tx d'impact	33%					67%					100%		133%		167%		200%	
Réutilisation	Fenêtre	Fenêtre réutilisée durée de vie corrigée (DVC = 60 ans)						Fenêtre réutilisée durée de vie corrigée (DVC = 60 ans)											
	Tx d'impact	Impacts " déjà amortis "			17%		33%		50%		67%		83%		100%				

Commentaire :

1° scénario « neuf + neuf » : au cours de la durée de vie prescrite au bâtiment, deux fenêtres neuves sont posées successivement en se conformant à leur durée de vie typique.

2. scénario « réutilisation » : une fenêtre est réutilisée afin d'en doubler la durée de vie, les impacts déjà amortis dans le passé sont ignorés.

A la fin de la DVP (50 ans) du bâtiment, les impacts d'une fenêtre sont deux fois plus importantes dans le scénario « neuf+neuf » que dans le scénario « réutilisation ».

2. Comparaison de variantes constructives

2.1. Présentation sommaire du projet

Le bâtiment à construire est une petite extension de l'école Ivry-Levassor à vocation pédagogique et reproductible du point de vue de sa démarche de conception et de construction.

- Le programme comprend essentiellement : 2 salles de BCD au rez-de-chaussée, une salle de classe à l'étage, un petit jardin éducatif.
- Bien que situé dans un espace peu ensoleillé en hiver une performance passive voire à énergie positive est recherchée.
- L'impact environnemental doit être aussi faible que possible. Dans ce cadre une utilisation privilégiée de matériaux biosourcés et/ou de proximité et/ou de réemploi est recommandée.

Après une série d'itérations l'équipe de maîtrise d'œuvre et ses assistants ont abouti à la définition d'un bâtiment :

- compact aux formes simples.
- dont la localisation et l'orientation a été guidées par une démarche bioclimatique contrainte par la configuration de la parcelle et des bâtiments environnants.
- dont les équipements techniques s'efforcent de conjuguer performances techniques et sobriété technologique.
- dont les éléments constructifs font largement appels aux matériaux biosourcés et/ou recyclés et/ou réemployés.

2.2. Récapitulatif des variantes constructives étudiées.

En coordination avec la maîtrise d'œuvre du projet, les variantes constructives suivantes (Figure 7) ont été étudiées :

- Approche conventionnelle
- Structure bois + approche conventionnelle
- Idem projet sans réemploi
- Projet intégrant des matériaux biosourcés et des produits réutilisés.

Figure 7: Composition des variantes constructives étudiées

			A	B	C	D
Thème	Sous thème	Localisation	Conventionnel	Struct bois + conventionnel	Idem projet sans réemploi	Projet
Structure	Fondations et soubassements	Fondations	Pieux béton		Pieux vissés	
		Longrines	Longrines béton		Poutres métal neuves	
	Dalles	Dalle RDC	Dalle portée béton PUR + Chape ciment + sol PVC		Parquet chêne français + Fermacell + Fib. bois + OSB + carton IPAC + Weather defence	
		Dalle R+1	Dalle béton Chape ciment + sol PV	Plancher sur solives Laine de verre + sol PVC	Plancher chêne français sur solives Ouate + Fib. bois + Fermacell	Plancher chêne français sur solives Carton + Fib. bois + Fermacell
Enveloppe	Parois horizontales	Toiture	Dalle béton Laine de roche dense	Dalle oss. Bois Laine de roche dense	Caissons bois Carton	
		Couverture	Etanchéité bi couche Végétalisation	Membrane EPDM		
	Parois verticales opaques	Mur mitoyen RDC	Pré mur béton + PSE	Mur oss. Bois Laine de verre + BA13	Mur oss. bois 160mm Briques terre crue Ouate	
		Murs enveloppe	Pré mur béton + PSE	Mur oss. Bois Laine de verre + BA13	Mur oss. bois + Paille	
		Revêtements enveloppe	Enduit minéral	Bardage bois importé		
	Parois verticales vitrées	Triple vitrage (pariéto dynamique)	Fenêtres alu TV	Fenêtres bois TV		
		Vitrages zone non chauffée	Fenêtres alu DV	Fenêtres bois DV		
	Second œuvre	Cloisons		BA 13 + L. minérale		BA 13 + Carton
Circulations	Sols		Sol souple PVC		Plancher massif en chêne français	
	Escaliers		Escalier béton	Escalier métal	Escalier bois	Escalier bois avec marches en bois de réemploi
		Coursive R+1	Coursive métal		Coursive bois	
		Terrasse	Dalles amovibles en béton	Platelage bois local		
Prod. énergétique	Electricité	Toiture	Panneaux PV			

2.3. Principaux paramètres du projet

Parcelle	
Surface parcelle	550 m ²
Surface végétalisée	290 m ²
Assainissement	Collectif
Gestion des eaux pluviales	Par infiltration
Bâtiment	
Durée de vie prescrite	50 ans
Surface de plancher (SDP)	228 m ²
Type	Enseignement primaire
Nb. Occupants	64
Robinet évier	3
Chantier	
Eau consommée	180 m ³
Rejet eau chantier	140 m ³

:

3. Composition des principales parois et éléments constructifs.

3.1. Fondations

Deux hypothèses ont été examinées pour la réalisation de fondations :

- Fondations semi profondes en béton (initialement préconisées par le bureau d'étude géotechnique).
- Fondations en acier de type « Techno-Pieux » mises en place sur le projet conformément à leur [ATec](#).

Afin de comparer les deux solutions, nous avons supposé que :

- La localisation des appuis du bâtiment sont identiques quelle que soit la solution choisie.
- Dans certains cas les Techno-pieux sont doublés afin d'atteindre les mêmes performances qu'un pieu de fondation béton mais leur longueur est précisément ajustée à la résistance mécanique du terrain.

La solution à base de pieux vissés en acier présente plusieurs avantages par rapport aux fondations semi profondes en béton :

- Une mise en œuvre par vissage plus facile que la réalisation de fondations semi profondes en béton car cette dernière nécessite la mobilisation d'une pelleuse et de blinder la paroi avant coulage du béton.
- Un ajustement de la profondeur de pose des pieux vissés réalisée en fonction de la nature réelle du terrain grâce à l'observation en temps réel de la pression de forage. La longueur cumulée de « Techno-pieux » mis en œuvre sur le chantier est de 139.1 m.
- Une mise en œuvre rapide et sèche.
- Une réversibilité inégalable de la solution acier.

3.1.1. Fondations semi profondes en béton

Selon l'étude géotechnique initiale réalisée pour un bâtiment en RDC

- les fondations en béton doivent être ancrées de minimum 0,3 m dans l'horizon H1 (Alluvions Anciennes) ;
- la base de l'horizon H1 est comprise en 8,1 et 9 m par rapport au terrain naturel
- un appui isolé devra avoir des dimensions minimales de 0,8x0,8 m

Sachant que le bâtiment réellement construit est en R+1 et en l'absence d'étude dédiée, nous avons considéré que les massifs devraient au minimum faire 1x1m et un linéaire équivalent à celui des pieux en métal.

3.1.2. Fondations vissées en acier

	Qté.	Poids	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Id. Inies	Sources
		<i>kg</i>	<i>kg. eq. CO2</i>	<i>MJ</i>		
Techno pieux	4 ml	52	+154	+ 2 126		FDES

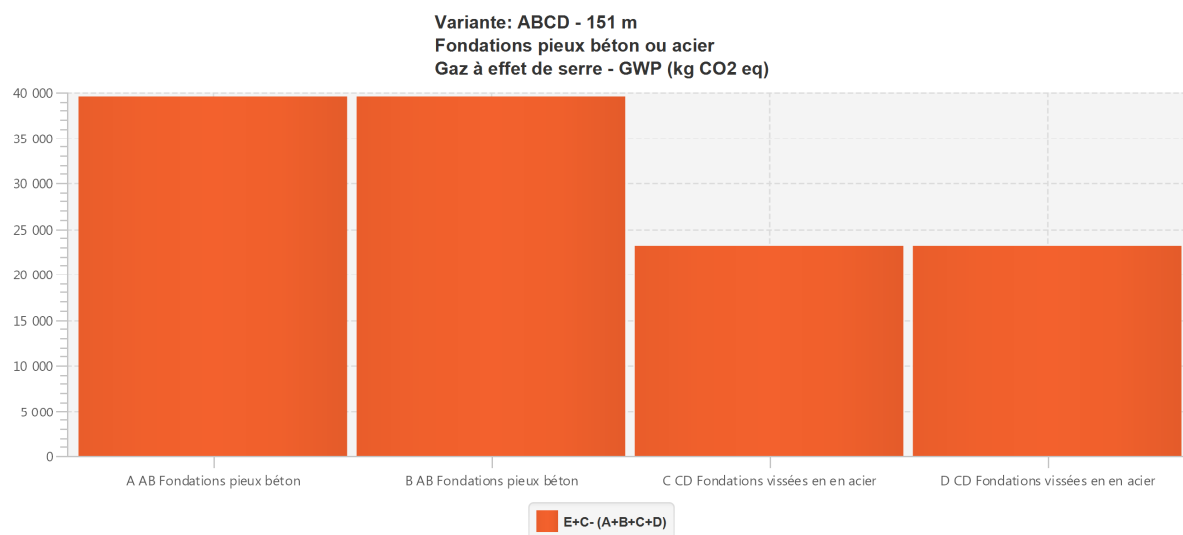
Commentaire :

- Les 23 appuis nécessaires à l'implantation du bâtiment ont été réalisés avec 39 Techno-pieux (certains sont doublés) qui ont les caractéristiques suivantes :
 - 7 TP - Modèle P5 - 12 :
 - . Hélice : $\varnothing$ 305 mm
 - . Tube : $\varnothing$ 141,3 mm - ép. : 6,6 mm
 - 32 TP - Modèle P3 - 10 :
 - . Hélice : $\varnothing$ 254 mm
 - . Tube : $\varnothing$ 88,9 mm - ép. : 5,5 mm

A partir de la FDES des pieux P3 et des données de chantier, les impacts environnementaux des fondations en pieux vissées ont été estimés ci-dessous.

	Diam ext (mm)	Ep. Paroi (mm)	Diam int (mm)	Vol acier estimé (mm3)	Vol acier estimé (m3)	ratio FDES	(kg/m)	longueur (m)	Poids cumulé (kg)	Longueur équivalente P3 (m)	GES (kg eq CO2)	Energie Grise (MJ)
Modèle P3 selon FDES et ATec	88.9	5.49	77.93	457.94835	0.00045795	1	12.75	109.20	1392.30			
Modèle P5 estimé via Atec	141.29	6.55	128.18	882.51425	0.00088251	1.92710433	24.57	21.90	538.10			
Total									1930.40	151.4	5 829	80 471

La comparaison entre variante béton et acier est en faveur de cette dernière mais il convient d'être prudent car une étude dédiée devrait être menée sur la solution béton.



3.2. Structure porteuse

Trois hypothèses ont été envisagées :

- Longrines béton
- Poutres métal neuves type S235 IPE 330 et IPE 360
- Poutres métal (datant des années 1980) réutilisées type S235 IPE 330 et IPE 360 – (non retenue sur l'opération).

	Année	Poids	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Id. Inies	Sources
		<i>kg</i>	<i>kg. eq. CO2</i>	<i>MJ</i>		
Longrines en béton		11 772	+1 549	+15 492	7675-1.1	DEP
Poutres métalliques neuves		4 968	+7 998	+106 315	7374-1.2	DEP vérifiée
Poutres métalliques de réemploi (solution non retenue en définitive)	1980	4 968	+4 879	+64 852	7374-1.2	DEP vérifiée

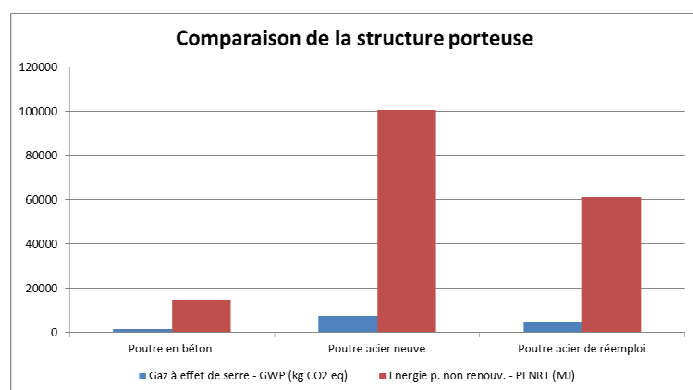


Figure 8: Comparaison des impacts de longrines béton et de poutres en acier neuves ou réemployées

Commentaire : Dans tous les cas, la solution en béton à un impact moins élevé que les solutions concurrentes en acier.

Les atouts éventuels de l'utilisation de l'acier sont donc techniques :

- Chantier sec
- Rapidité de mise en œuvre.
- Légèreté.

Du point de vue environnemental on peut y ajouter un avantage du point de vue de la potentielle réutilisabilité de poutres en métal qui n'a pas pu être mise en place sur le chantier.

3.3. Dalle du RDC

Au niveau de la dalle du RDC les solutions comparées sont :

- Une dalle conventionnelle en béton isolée en polyuréthane avec chape ciment et sol souple PVC.
- Une dalle formée de caissons bois + carton, + chape sèche fermacell avec résilient intégré de 30+10mm et parquet chêne massif français

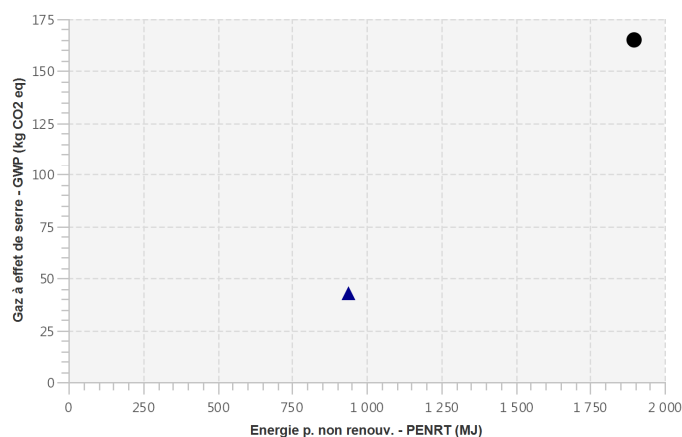
Dalle portée béton + PUR + chape ciment + sol PVC

R. thermique (m2.K/W) :	2,8							
Déphasage Δt (h) :	9,3							
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	8,67							
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	314							
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K):	3768							
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,00							
				<i>kg/m²</i>	<i>kg. eq. CO2</i>	<i>MJ</i>		
Sol PVC	m2	1.0	0,30	+30,23	+609,97	7883-1.2	DEP vérifiée	ETNICE
Chape ciment	mm	50	110,00	+30,90	+244,00	6291-1.1	MDEGD	
Polyuréthane	mm	70	2,85	+19,81	+196,81	6499-1.1	DEP vérifiée	
Dalle béton	mm	200	477,40	+53,10	+501,00	7673-1.1	DEP	
Prédalle béton	mm	50	125,00	+24,94	+271,40	4832-1.2	DEP	
TOTAL			716	+158,97	+1 823,18			

Dalle bois + carton, + chape sèche fermacell + Fib. bois + Parquet chêne massif français

R. thermique (m2.K/W) :	7,3							
Déphasage Δt (h) :	17,15							
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	1,12							
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	65							
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K):	778							
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,24							
				<i>kg. eq. CO2</i>	<i>MJ</i>			
Parquet massif en chêne fab. en France	mm	23	+2,55	+351,00	10540-1.4	FCBA	DEP vérifiée	
Fermacell	mm	12	+7,04	+139,26		FERMACELL	FDES Fermacell	
Fermacell	mm	12	+7,04	+139,26		FERMACELL	FDES Fermacell	
Résilient Fibre de bois	mm	10	-2,29	+26,78		PAVATEX	DEP Pavatex	
Panneaux OSB	mm	16	+3,03	+121,00	12745-1.1	FCBA	DEP vérifiée	CTBA UIPP
Panneau carton IPAC	mm	200	+23,56	+69,13		BAT'IPAC	BAT'IPAC	EEFCO ICO
Lambourdes bois	__x__x__	2000x200x100	+1,41	+54,97	4156-1.1	Créaboïs	DEP vérifiée	ENVIRONDEC
Weather Defence	mm	20	+4,70	+90,50	12271-1.2	SINIAT	DEP vérifiée	
TOTAL			+47,04	+991,90				

Comparaison d'éléments constructifs
Energie p. non renouv. - PENRT (MJ)
Gaz à effet de serre - GWP (kg CO₂ eq)
E+C- (A+B+C+D)



Commentaire: Que ce soit en terme de légèreté, de résistance thermique ou d'impacts environnementaux, la solution bois est nettement plus performante que sa concurrente à base de béton.

● AB RDC - Dalle portée béton + PUR + chape ciment
▲ CD RDC - Parquet chêne fr + Fermacell + Fib. bois + OSB + carton IPAC + Weather defence

3.4. Dalle du R+1

Au niveau de la dalle du R+1 les solutions comparées sont :

- Une dalle conventionnelle en béton avec chape ciment et sol souple PVC.
- Un plancher bois sur solives avec isolation phonique en laine de verre et sous face en plaques de plâtre.
- Un plancher bois sur solives avec isolation phonique en ouate de cellulose + sable et sous face en plaques de plâtre
- Un plancher bois sur solives avec isolation phonique en carton + sable et sous face en plaques de plâtre

Variante A : R+1 - Dalle béton + chape ciment

R. thermique (m2.K/W) :	0,1	U.	Qté.	λ	Poids	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Id. Inies	Sources
Déphasage Δt (h) :	7,0								
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	16,12								
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	308								
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K):	3697								
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,00								
					kg/m²	kg. eq. CO2	MJ		
Sol PVC		m2	1.0	0,160	6,21	+67,00	+2 590,00	5949-1.1	MDEGD
Chape ciment		mm	50	2,000	121,63	+19,40	+155,00	2478-1.1	FDES SNPE
Dalle béton		mm	200	2,500	477,40	+53,10	+501,00	7673-1.1	DEP
Prédalle en béton armé		mm	50	2,300	125,00	+24,94	+271,40	4832-1.2	DEP
TOTAL					730	+164,44	+3 517,40		

Variante C : R+1 - Plancher sur solives + ouate + PP

R. thermique (m2.K/W) :	7,2	U.	Qté.	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Id. Inies	Sources
Déphasage Δt (h) :	13,34						
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	3,04						
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	37						
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K):	447						
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,28						
				kg. eq. CO2	MJ		
Linoléum	m2	1.0	+32,60	+734,00	9246-1.1	DEP vérifiée	
BA10	mm	12	+1,97	+41,28	10385-1.4	DEP vérifiée PLACO	
BA 10	mm	12	+1,97	+41,28	10385-1.4	DEP vérifiée PLACO	
Fibre de bois	mm	10	-2,39	+28,00		DEP Pavatex	
Panneau OSB	mm	16	+1,94	+104,00	12744-1.1	DEP vérifiée CTBA UIPP	
Ouate de cellulose	mm	250	+2,41	+55,96	10808-1.2	DEP vérifiée	
Solives	__x__x__	2000x300x100	+2,12	+82,45	4156-1.1	DEP vérifiée	
Lame d'air	mm	132	+0,00	+0,00	0000-1,0		
Ossature métal	m	3	+6,69	+74,42	14213-1.2	MDEGD	
BA18	mm	18	+4,59	+71,50	3139-1.2	FDES Knauf	
BA18	mm	18	+4,59	+71,50	3139-1.2	FDES Knauf	
TOTAL			+56,48	+1 304,39			

Variante D : R+1 - Plancher sur solives + IPAC® + plaques de plâtre

R. thermique (m2.K/W) :	9,4	U.	Qté.	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Id. Inies	Sources
Déphasage Δt (h) :	20,92						
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	0,42						
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	37						
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K):	440						
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,28						
				kg. eq. CO2	MJ		
Linoléum	m2	1.0	+32,60	+734,00	9246-1.1	DEP vérifiée	
BA10	mm	10	+1,64	+34,40	10385-1.4	DEP vérifiée PLACO	
BA10	mm	10	+1,64	+34,40	10385-1.4	DEP vérifiée PLACO	
Fibre de bois	mm	10	-2,39	+28,00		DEP Pavatex	
OSB	mm	16	+1,94	+104,00	12744-1.1	DEP vérifiée CTBA UIPP	
OSB	mm	16	+1,94	+104,00	12744-1.1	DEP vérifiée CTBA UIPP	
Panneau IPAC®	mm	250	+27,98	+82,09		BAT*IPAC FEECO ICO ENVIRONDEC	
Solives	__x__x__	2000x300x100	+2,12	+82,45	4156-1.1	DEP vérifiée	
Lame d'air	mm	132	+0,00	+0,00	0000-1,0		
Ossature métal	m	3	+6,69	+74,42	14213-1.2	MDEGD	
BA18	mm	18	+4,59	+71,50	3139-1.2	FDES Knauf	
BA18	mm	18	+4,59	+71,50	3139-1.2	FDES Knauf	
TOTAL			+83,34	+1 420,77			

La comparaison des 4 solutions constructives des murs d'enveloppe montre :

- Que la solution maçonnée est à la fois la plus lourde (730 kg/ m²) et la moins performante du point de vue environnemental de l'ensemble examiné.
- La plus légère (61 kg) est la solution conventionnelle à ossature bois et remplissage isolant en laine de verre. Il est toutefois probable qu'elle est moins performante acoustiquement que ses concurrentes.
- Les deux dernières solutions (C, D) sont à la fois très proches techniquement (plancher à ossature bois, remplissage isolant biosourcé, amortissement acoustique en fibre de bois) et du point de vue environnemental. De ce point de vue, on notera que l'isolant en carton IPAC (voir § 7.1) présente un bilan environnemental légèrement moins favorable que celui de la ouate de cellulose.

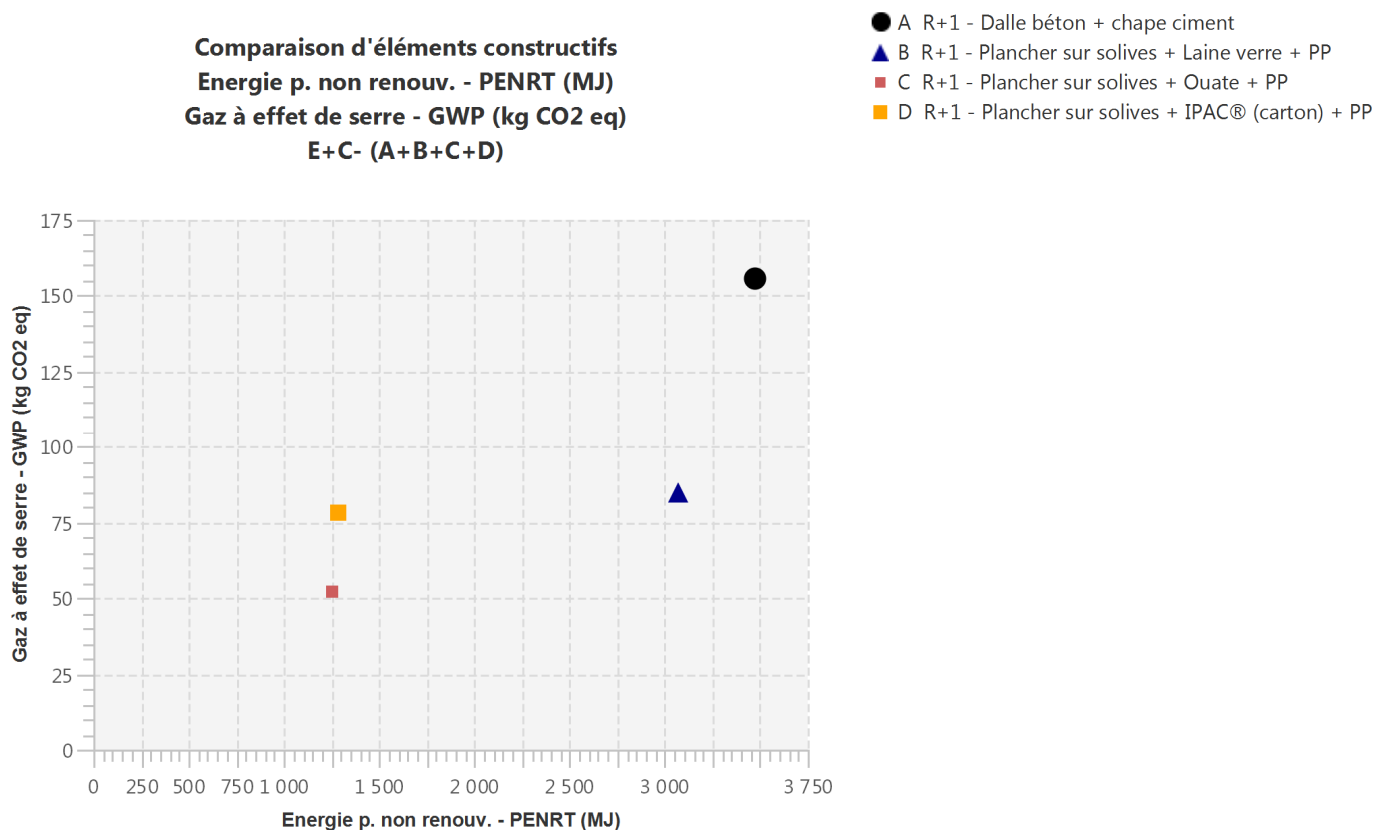


Figure 9: Comparaison des impacts des dalles du R+1

3.5. Toiture

Au niveau de la toiture les solutions comparées sont :

- Variante A : une dalle conventionnelle en béton avec étanchéité bicouche et végétalisation extensive.
- Variante B : une dalle à ossature-bois avec isolation thermique extérieure en laine de roche et membrane d'étanchéité.
- Variante C et D : une dalle à ossature bois avec isolation thermique en carton (IPAC) et membrane d'étanchéité.

Variante A : Toiture - Dalle béton + Laine de roche + Etanchéité bicouche

R. thermique (m2.K/W) :	6,5	U.	Qté.	λ	Poids	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Sources
Déphasage Δt (h) :	15,1							
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	1,94							
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	312							
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K):	3745							
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,00							
					kg/m²	kg. eq. CO2	MJ	
Substrat végétalisation	mm	10.	1,500	4,00	+2,75	+43,01	MDEGD Ecovégétal Adivet Plantes et cité	
Etanchéité bi couche	m2	1.0	2,300	7,66	+9,13	+333,20	DEP vérifiée	
Laine de roche	mm	250	0,039	30,00	+36,25	+596,43	DEP vérifiée ACERMI	
Dalle béton	mm	200	2,500	477,40	+53,10	+501,00	DEP	
Pré dalle béton	mm	50	2,300	125,00	+24,94	+271,40	DEP	
TOTAL				644	+126,17	+1 745,04		

Variante B Toiture - Dalle ossature bois + Laine de roche + Membrane d'étanchéité

R. thermique (m2.K/W) :	6,8	U.	Qté.	λ	Poids	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Sources
Déphasage Δt (h) :	12,3							
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	4,03							
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	42							
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K):	504							
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,05							
					kg/m²	kg. eq. CO2	MJ	
Substrat végétalisation	mm	10	1,500	4,00	+2,75	+43,01	MDEGD Ecovégétal Adivet Plantes et cité	
Membrane d'étanchéité	m2	1.0	2,300	7,66	+9,13	+333,20	DEP vérifiée	
Laine de roche	mm	250	0,039	30,00	+36,25	+596,43	DEP vérifiée ACERMI	
OSB	mm	16	0,130	9,92	-7,56	+119,00	FDES vérifié CTBA UIPP	
Ossature bois porteuse	m3	0.03	0,150	15,31	+1,06	+41,23	DEP vérifiée	
Ossature support BA 13	m	3	50,000	0,90	+2,19	+30,00	DEP vérifiée	
Pare vapeur	m2	1.0	2,300	0,70	+1,47	+38,64	MDEGD	
BA13	mm	12	0,250	8,16	+1,97	+41,28	DEP vérifiée PLACO	
TOTAL				77	+47,26	+1 242,78		

Variante C et D : Toiture - Caissons ossature bois + carton + Membrane d'étanchéité

R. thermique (m2.K/W) :	8,5							
Déphasage Δt (h) :	17,2							
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	1,12	U.	Qté.	λ	Poids	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Sources
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	19							
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K) :	222							
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,29							
				<i>kg/m²</i>	<i>kg. eq. CO2</i>	<i>MJ</i>		
Substrat végétalisation	kg	10	1,500	10,00	+6,87	+107,52		MDEGD Ecovégétal Adivet Plantes et cité
Membrane d'étanchéité	m2	1.0	0,500	1,75	+7,58	+182,89		DEP vérifiée
OSB	mm	16	0,130	9,92	-7,56	+119,00		FDES vérifié CTBA UIPP
Panneau carton IPAC®	mm	250	0,030	35,75	+36,81	+108,02		BATIPAC FEFCO ICO ENVIRONDEC
Ossature bois porteuse	m3	0.03	0,150	15,31	+1,06	+41,23		DEP vérifiée
Ossature support BA 13	m	0	0,014	0,00	+0,00	+0,00		MDEGD
Pare vapeur	m2	1.0	2,300	0,70	+1,47	+38,64		MDEGD
BA13	mm	12	0,250	8,16	+1,97	+41,28		DEP vérifiée PLACO
TOTAL				82	+48,20	+638,57		

La comparaison des 3 solutions constructives applicables à des toitures montre que :

- la solution maçonnée est à la fois la plus lourde (644 kg/m²) contre moins de 100 kg/m² pour les autres et la moins performante du point de vue environnemental (Figure 10).
- Du point de vue thermique les performances sont proches mais que malgré sa masse, la solution lourde maçonnée ne peut rivaliser avec la solution à base de carton.

En conclusion on peut noter que la solution à base de panneau IPAC est la plus performante de tous les points de vue examinés ici.

Comparaison d'éléments constructifs
Energie p. non renouv. - PENRT (MJ)
Gaz à effet de serre - GWP (kg CO2 eq)
E+C- (A+B+C+D)

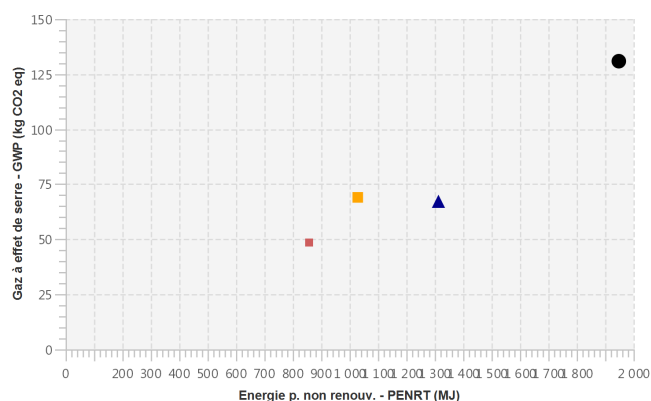


Figure 10: Comparaison des impacts de différents types de toitures

Comparaison d'éléments constructifs
Déphasage (hh:mm)
Résist. therm (m²K/W)
E+C- (A+B+C+D)

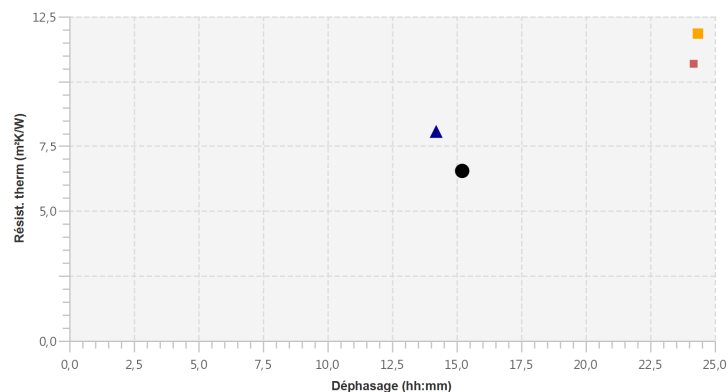


Figure 11: Comparaison des performances thermiques de différents types de toitures

- A Toiture - Dalle béton + Laine de roche + Etanchéité
- ▲ B Toiture - Dalle ossature bois + Laine de roche + Etanchéité
- CD Toiture BCD - Caissons ossature bois + carton + Etanchéité
- CD Toiture salle de classe - Caissons ossature bois + carton + Etanchéité

3.6. Murs d'enveloppe

Au niveau des murs d'enveloppe les solutions comparées sont :

- Un mur préfabriqué en béton avec une âme en polystyrène dont la finition est enduite.
- Un mur à ossature-bois isolé en laine de verre dont la finition est un bardage bois importé et des plaques de plâtre.
- Un mur à ossature-bois isolé en paille dont la finition est un bardage bois importé et panneau 3 plis bois.
- Un mur à ossature-bois isolé en paille dont la finition est un bardage bois importé et un lambris en bois.

Variante A - Mur préfabriqué PSE + Béton

R. thermique (m ² .K/W) :	1,9							
Déphasage Δt (h) :	18,0							
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	0,91							
Inertie quotidienne kJ/(m ² .K) :	46							
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m ² .K):	554							
Vol. produits biosourcés (m ³ /m ²) :	0,00							
					<i>kg/m²</i>	<i>kg. eq. CO2</i>	<i>MJ</i>	
Enduit minéral	mm	15	0,700	24,00	+4,96	+46,89	DEP vérifiée	
Mur préfabriqué à coffrage intégré isolé en béton	mm	280	0,150	299,88	+112,00	+1 340,00	EDES	
Enduit de plâtre	mm	10	0,400	2,50	+0,45	+8,89	DEP vérifiée	
TOTAL				326	+117,41	+1 395,78		

Variante B - Bardage bois importé + Ossature bois + Laine de verre + FV + PP

R. thermique (m ² .K/W) :	5,5							
Déphasage Δt (h) :	6,2							
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	19,53							
Inertie quotidienne kJ/(m ² .K) :	18							
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m ² .K):	221							
Vol. produits biosourcés (m ³ /m ²) :	0,04							
					<i>kg/m²</i>	<i>kg. eq. CO2</i>	<i>MJ</i>	
Bardage bois importé	mm	20	0,130	8,10	+3,23	+84,64	DEP vérifiée	
Lame d'air ventilée	mm	40	0,192	0,04				
Liteaux	—x—x—	2000x40x40	0,150	1,63	+0,11	+4,40	DEP vérifiée	
Plaque silico calcaire	mm	12	0,190	13,20	+10,40	+119,00	MDEGD	
Laine de verre	mm	160	0,032	4,07	+5,25	+138,40	DEP vérifiée ACERMI	
Ossature bois	—x—x—	3000x160x45	0,150	11,02	+0,76	+29,68	DEP vérifiée	
Pare vapeur	m2	1.0	2,300	0,70	+1,47	+38,64	MDEGD	
Ossature BA13	m	3	0,014	0,01	+9,69	+168,00	MDEGD	
BA13	mm	12	0,250	11,33	+2,58	+51,65	DEP vérifiée PLACO	
TOTAL				50	+33,49	+634,41		

Variante CD - Bardage. bois importé + Ossature bois + paille + FV + fibre de bois + panneau 3 plis

Quantité (m2)	1,00	U.	Qté.	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Id. Inies	Sources
R. thermique (m2.K/W) :	9,3						
Déphasage Δt (h) :	22,04						
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	0,31						
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	29						
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K):	352						
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,48						
				kg. eq. CO2	MJ		
Bardage de mélèze importé	mm	27	+4,36	+114,26	8369-1.4	DEP vérifiée	
Lame d'air ventilée	mm	40	+0,00	+0,00	0000-1,0		
Liteaux	__x__x__	2000x40x40	+0,11	+4,40	4156-1.1	DEP vérifiée	
P. plâtre protect. feu	mm	12	+0,03	+0,47	8651-1.1	DEP vérifiée Avis techniques Atec / DTA	
Bottes de paille	mm	370	-12,20	+35,47	3248-1.3	DEP vérifiée Règles pro. RFCP	
Ossature bois	__x__x__	3000x370x45	+1,76	+68,64	4156-1.1	DEP vérifiée	
Pare vapeur	m2	1.0	+2,45	+64,40	7991-1.1	MDEGD	
OSB	mm	16	+1,94	+104,00	12744-1.1	DEP vérifiée CTBA UIPP	
Laine de bois	mm	50	+3,13	+59,85	7798-1.2	DEP vérifiée ACERMI	
Tasseaux	__x__x__	2000x50x50	+0,18	+6,87	4156-1.1	DEP vérifiée	
Panneau 3 plis	mm	19	+0,56	+69,24	10802-1.3	DEP vérifiée	
TOTAL			+2,31	+527,62			

Variante D bis – Parement en plâtre gros sur treillis métal + Ossature bois + paille + FV + panneau 3 plis

Quantité (m2)	1,00	U.	Qté.	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Id. Inies	Sources
R. thermique (m2.K/W) :	8,5						
Déphasage Δt (h) :	19,59						
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	0,59						
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	35						
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K):	424						
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,43						
				kg. eq. CO2	MJ		
Enduit plâtre gros	mm	10	+2,07	+43,50	8945-1.1	DEP vérifiée	
Lattis métal	m2	1.0	+4,22	+45,39		Métal déployé	
Lame d'air ventilée	mm	40	+0,00	+0,00	0000-1,0		
Liteaux	__x__x__	2000x40x40	+0,11	+4,40	4156-1.1	DEP vérifiée	
P. plâtre protect. feu	mm	20	+4,70	+90,50	12271-1.2	DEP vérifiée	
Bottes de paille	mm	370	-12,20	+35,47	3248-1.3	DEP vérifiée Règles pro. RFCP	
Ossature bois	__x__x__	3000x370x45	+1,76	+68,64	4156-1.1	DEP vérifiée	
Pare vapeur	m2	1.0	+2,45	+64,40	7991-1.1	MDEGD	
Fibre de bois	m2	1.0	-7,96	+126,00	12574-1.1	DEP vérifiée Pavatex SOPREMA	
Panneau 3 plis	mm	18	+0,53	+65,60	10802-1.3	DEP vérifiée	
TOTAL			-4,33	+543,90			

La comparaison des solutions constructives des murs d'enveloppe montre :

- Une nette différence de poids entre la solution maçonnée 326 kg / m²), la solution à ossature bois et laine minérale (50 kg/m²) et les solutions à ossature bois et remplissage isolant en paille (90 kg/m²).
- Des performances thermiques contrastées avec :
 - Une solution maçonnée dont la résistance thermique est relativement médiocre mais le temps de déphasage élevé (18h).
 - Une solution à ossature bois et laine minérale dont la résistance thermique est élevée (5,5 m².K/W) mais le temps de déphasage médiocre (5,5h).
 - Une solution à ossature bois et remplissage isolant en paille et bardage bois qui présente d'excellentes performances thermique avec une résistance thermique de 7,6 m².K/W et un déphasage de plus de 18h.
 - Une solution à ossature bois et remplissage isolant en paille avec parement extérieur au plâtre gros qui présente des qualités quasiment comparable à la précédente.
- Des impacts environnementaux très différents entre la solution maçonnée qui est 2 à 3 fois moins performante que la solution à ossature bois et laine minérale. Cette dernière est elle-même nettement moins performante que les deux solutions bois/paille qui stockent même un peu de CO₂.
- Le seul inconvénient de la solution « paille » est l'épaisseur de la paroi qui est plus importante que celle de ses concurrentes.

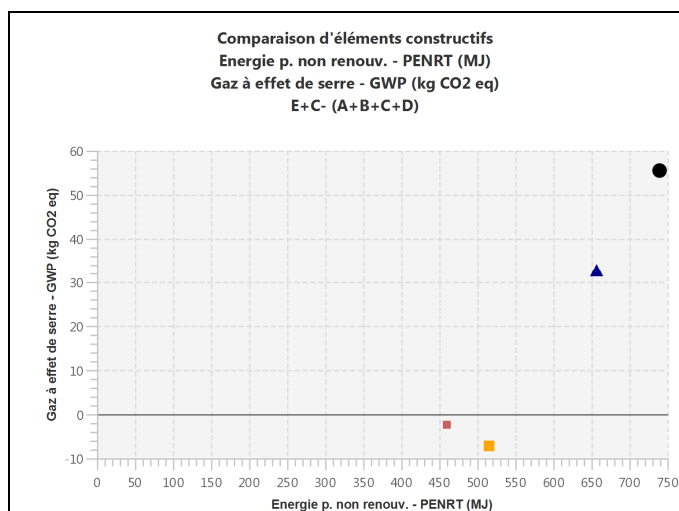


Figure 12: Comparaison des impacts des murs d'enveloppe

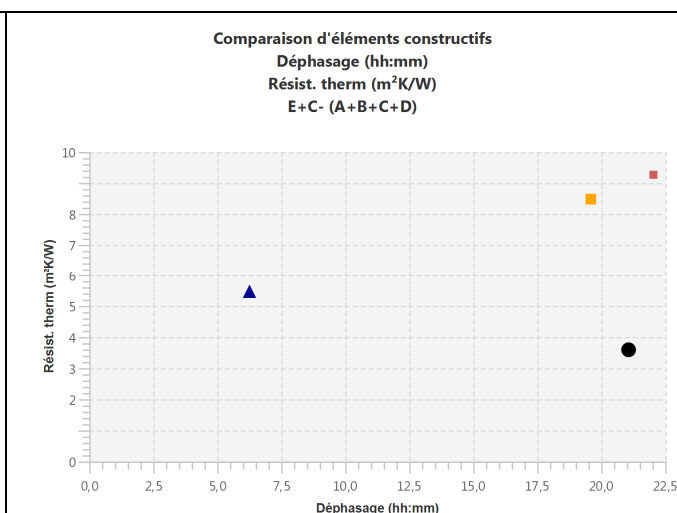


Figure 13: Comparaison des performances thermiques des murs d'enveloppe

- A - Mur préfabriqué PSE + Béton
- ▲ B - Bard. bois importé + Ossature bois + Laine de verre + FV + PP
- CD1 - Bard.importé + Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV + Panneau 3 plis
- D3 - End. plâtre + Lattis métal + Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV + Fib. bois + Panneau 3 plis

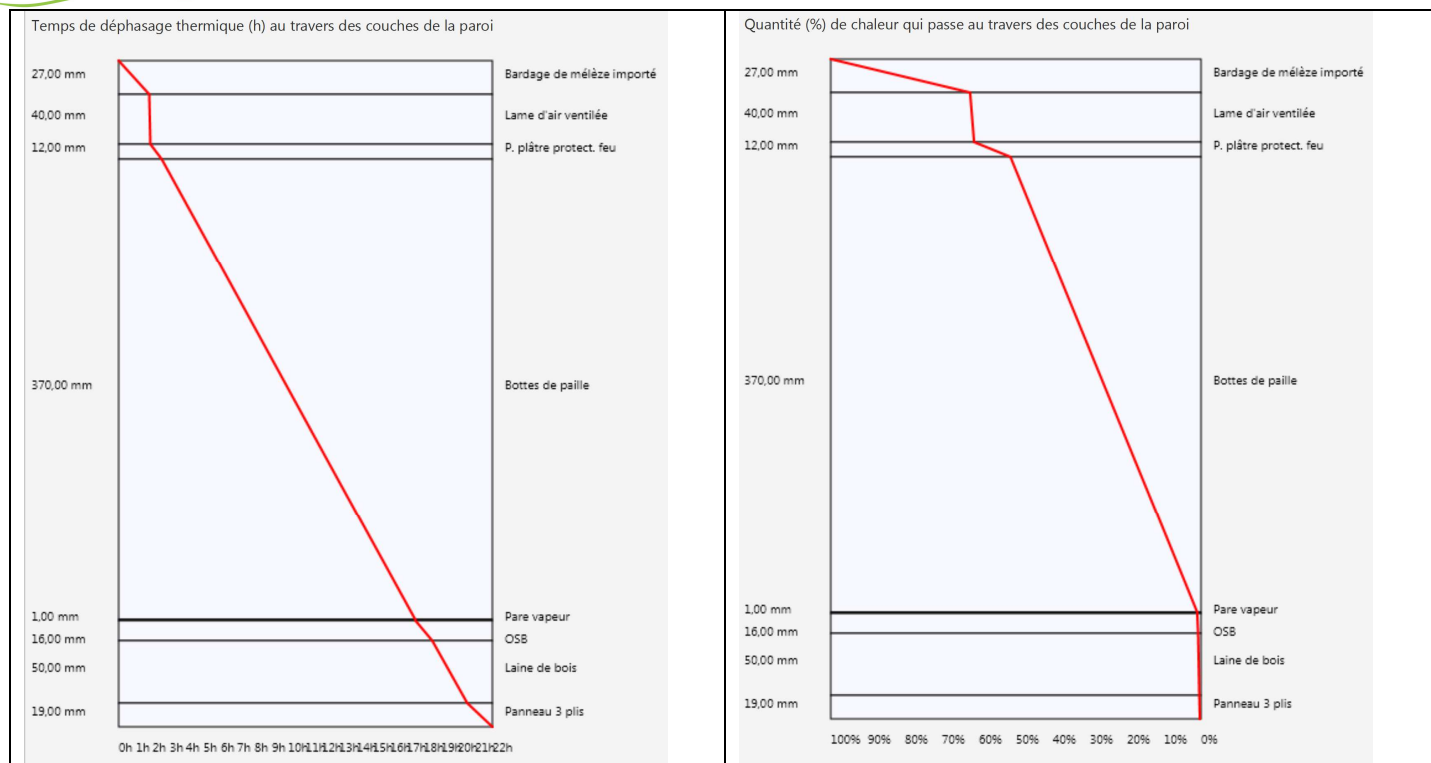


Figure 14 Temps de déphasage thermique et amortissement de la chaleur

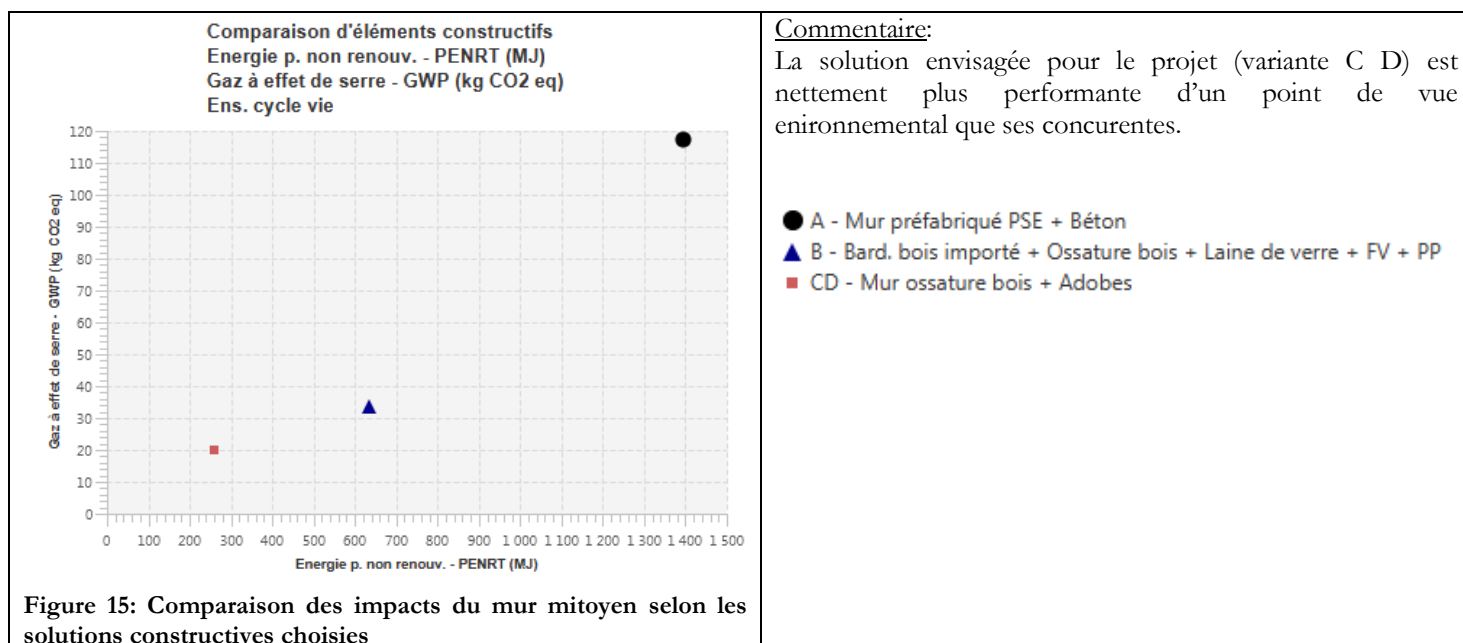
3.7. Mur mitoyen RDC

Une partie du futur bâtiment sera accolée à une galerie technique maçonnée. Le mur mitoyen doit donc être indépendant de celle-ci et isolé. A ce niveau, les solutions constructives comparées sont :

- Un mur préfabriqué en béton avec une âme en polystyrène dont la finition est enduite (idem mur d'enveloppe de la variante A – voir § 3.6).
- Un mur à ossature-bois isolé en paille dont la finition est un bardage bois importé et un lambris en bois (idem mur d'enveloppe de la variante B – voir § 3.6).
- Un mur à ossature-bois isolé en ouate de cellulose avec une finition en brique de terre crue côté intérieur et une plaque silico calcaire côté extérieur.

Variante C et D - Mur ossature bois + Ouate de cellulose + Adobes

R. thermique (m2.K/W) :	3,6	U.	Qté.	λ	Poids	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Sources
Déphasage Δt (h) :	8,3							
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	11,38							
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	123							
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K):	1475							
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,22							
					kg/ m²	kg. eq. CO2	MJ	
Plaque silicate de calcium	mm	10	1,000	8,85	+5,46	+94,60	DEP vérifiée	
Ouate	mm	136	0,040	5,72	+1,45	+33,69	DEP vérifiée	
Briques de terre crue	mm	100	0,700	140,00	+12,43	+101,43	MDEGD	
Ossature bois	__x__x__	3000x160x45	0,150	11,02	+0,76	+29,68	DEP vérifiée	
TOTAL				166	+20,10	+259,40		



3.8. Fenêtres

Deux grands types d'usage des fenêtres sont prévus :

- Des fenêtres isolantes et étanches à l'eau et à l'air pour la zone chauffée du bâtiment.
- Des fenêtres qui protègent de l'eau, du vent mais qui jouent aussi un rôle de tampon thermique dans les circulations extérieures. N'ayant pas de performance thermique importante à fournir, elles peuvent être issues du réemploi.

Nous comparons donc ici :

- D'une part :
 - o Une variante A conventionnelle avec des fenêtres neuves à cadre aluminium et double ou triple vitrage selon localisation.
 - o Des variantes B, C, et D avec des fenêtres neuves à cadre bois et double ou triple vitrage selon localisation.
- D'autre part :
 - o Une variante A, qui mobilise des fenêtres neuves à cadre en aluminium et double ou triple vitrage selon localisation.
 - o Des variantes B et C et D avec des fenêtres neuves à cadre de bois et double ou triple vitrage selon localisation.

Sans surprise :

- les impacts environnementaux sont plus faibles pour :
 - o les menuiseries bois que pour celles en aluminium
 - o les matériaux de réemploi.
- les performances thermiques sont les meilleures avec du triple vitrage sur un cadre de bois.

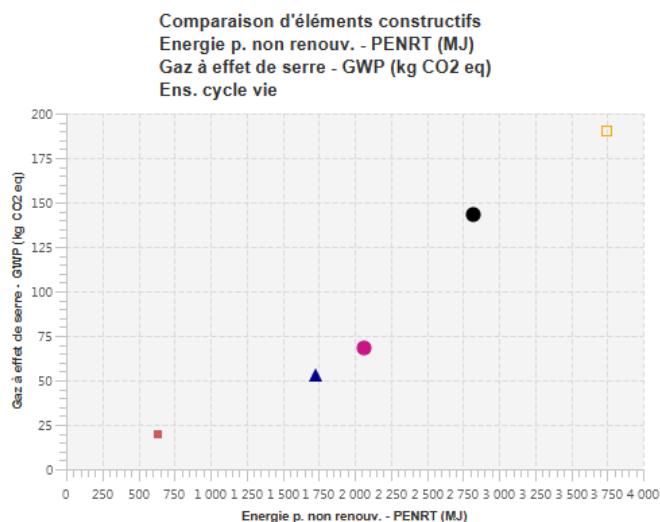


Figure 16: Comparaison des impacts des différents types de fenêtre

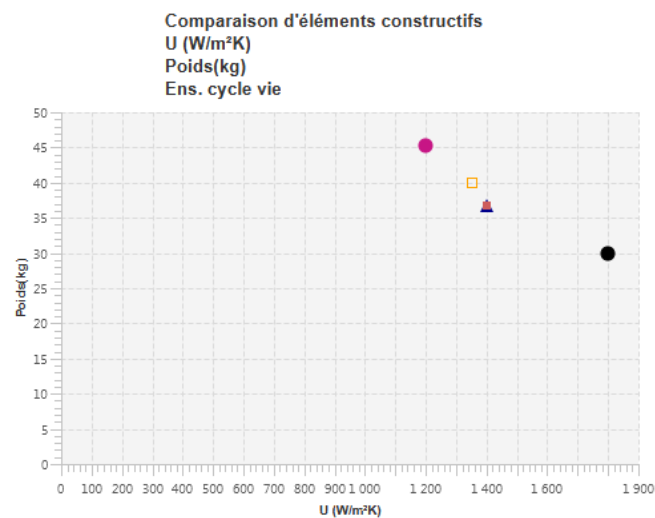


Figure 17: Comparaison du poids et des déperditions thermiques des différents types de fenêtres

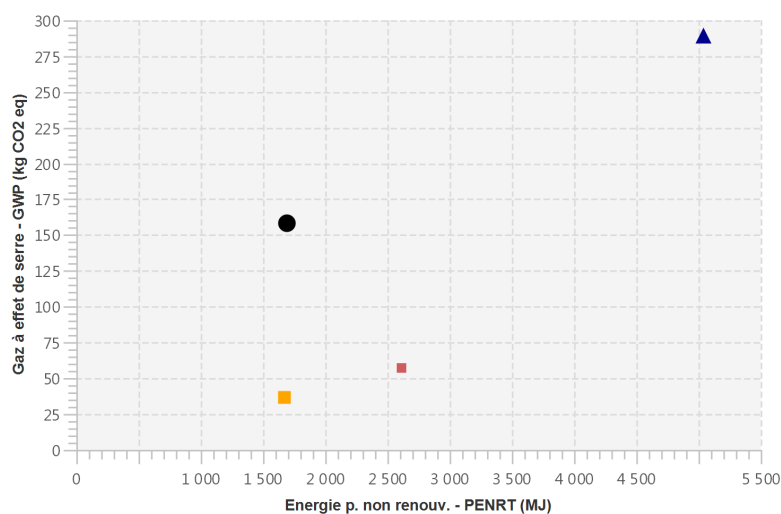
- Fenêtre double vitrage Aluminium
- ▲ Fenêtre double vitrage bois
- Fenêtre double vitrage bois de réemploi
- Fenêtre triple vitrage Aluminium
- Fenêtre triple vitrage bois

3.9. Escalier

Quatre variantes d'escaliers ont été comparées :

- Escalier béton neuf
- Escalier métal neuf
- Escalier bois neuf
- Escalier à structure bois neuve avec marches issues de la récupération.

Comparaison d'éléments constructifs
Energie p. non renouv. - PENRT (MJ)
Gaz à effet de serre - GWP (kg CO2 eq)
E+C- (A+B+C+D)



Commentaire: D'un point de vue environnemental, la solution béton est plus vertueuse que la solution métal. On notera qu'une solution bois avec une partie en réemploi apport un gain environnemental significatif.

- A - Escalier béton
- ▲ B - Escalier métal
- C - Escalier bois neuf
- D - Escalier bois : Limon neuf + Marches réemploi

4. Maquette numérique du bâtiment

Une maquette numérique du bâtiment a été réalisée sous Archicad et mise à disposition par la maîtrise d'ouvrage. Elle a été exportée au format IFC 2x3 avec ses métrés (appelés IfcBaseQuantities ou «quantités de base»).

La maquette a été utilisée avec le logiciel COCON-BIM.

Analyse du contenu de la maquette 3D :

- L'ensemble des éléments constructifs à l'exception des fondations et de la structure ont été modélisés en 3D.
- Les différentes catégories d'éléments constructifs (murs, dalles, fenêtres, etc.) ont été correctement modélisés.
- En revanche :
 - les facilités offertes par les « éléments constructifs type » n'ont pas été employées.
 - les libellés associés aux éléments constructifs étaient fréquemment erronés. En conséquence, nous avons renommé l'ensemble des éléments constructifs dans la maquette numérique.
 - les sanitaires voisins qui sont en dehors de l'opération pourraient être exclus de cette maquette.

Compléments 2D :

Afin de compléter la maquette 3D les éléments 2D suivants ont été ajoutés via COCON-BIM :

- Fondations
- Structure porteuse.

Variantes

Comme convenu avec la maîtrise d'ouvrage, quatre variantes ont été étudiées et comparées.

A	B	C	D
Conventionnel	Structure bois + conventionnel	"Idem projet sans réemploi"	Projet

5. Analyse en cycle de vie à l'échelle du bâtiment

L'ACV du bâtiment a été réalisée avec le logiciel COCON-BIM.

- La durée (DVP) de vie prescrite est de 50 ans.
- Pour chacune des variantes, les éléments constructifs ont été modélisés.

L'analyse en cycle de vie confirme la validité des choix réalisés par l'équipe de maîtrise d'œuvre et ses assistants que ce soit au niveau des émissions de GES (Figure 20) ou des consommations d'énergie grise (Figure 23).

La Figure 25 met bien en évidence la légèreté des solutions constructives à base de bois. On peut supposer que les fondations préconisées par le bureau d'étude géotechnique auraient été plus conséquentes si le projet avait été conçu en béton.

5.1. Label « Bâtiment biosourcé »

Toutes les variantes constructives bois (B, C, D) atteignent le niveau 3 (le plus élevé) du label « bâtiment biosourcé » (Figure 18).

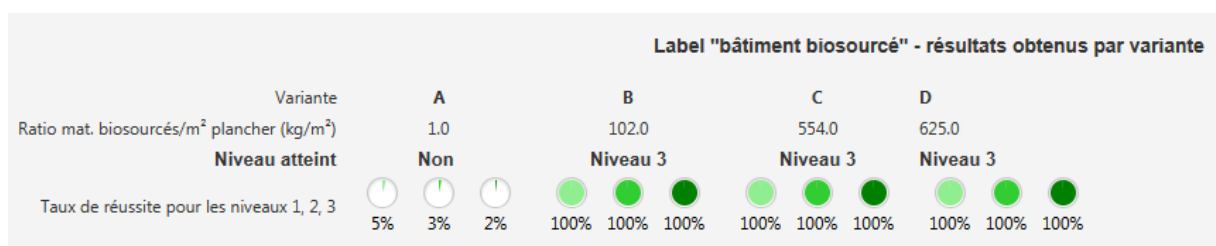


Figure 18: Label bâtiment biosourcé et niveau par variante

5.2. Répartition des GES entre matériaux et équipements

Les équipements techniques (hors PV) ont été évalués à partir des valeurs forfaitaires du label « E+C ». Cette approche ne permet pas d'estimer les différences de conception des organes techniques des bâtiments.

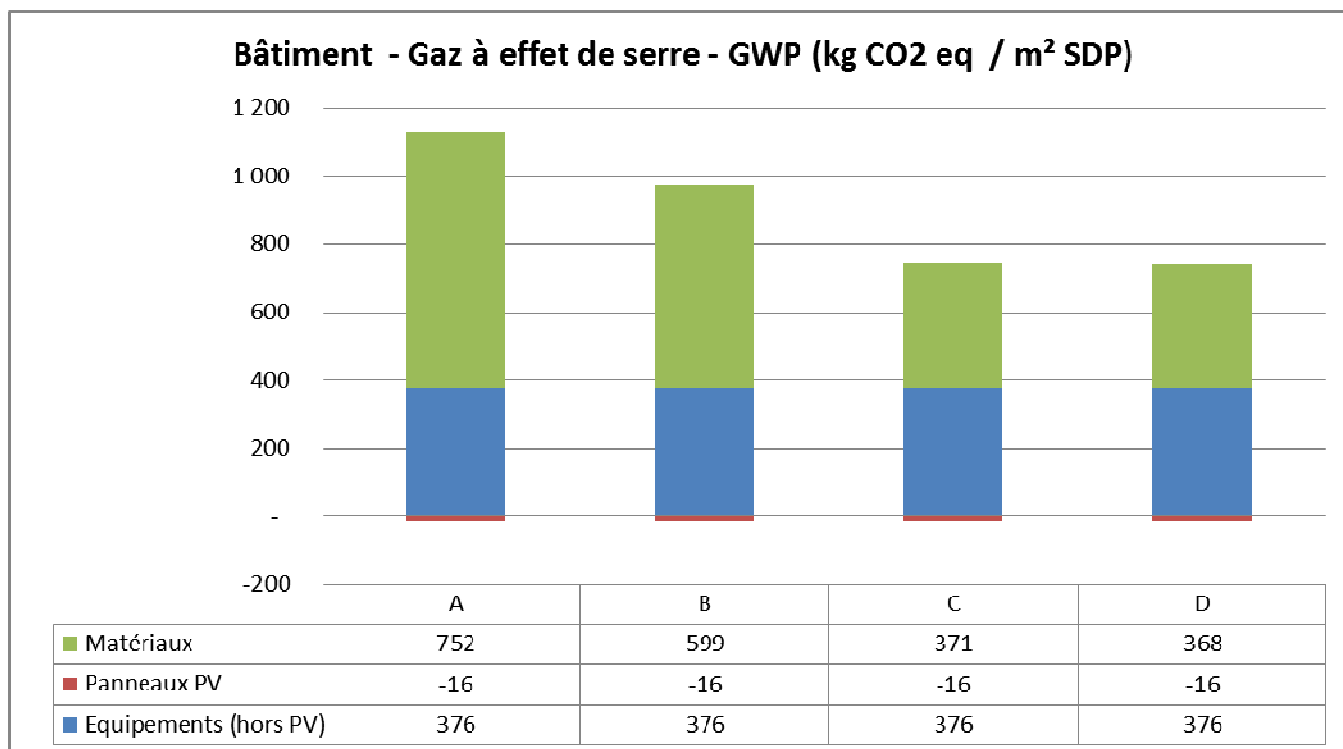


Figure 19: Répartition des GES du bâtiment par m² de SDP et selon leur origine (matériaux / équipements)

5.3. Comparaison des émissions de GES et de consommation d'énergie grise entre les différentes variantes des bâtiments

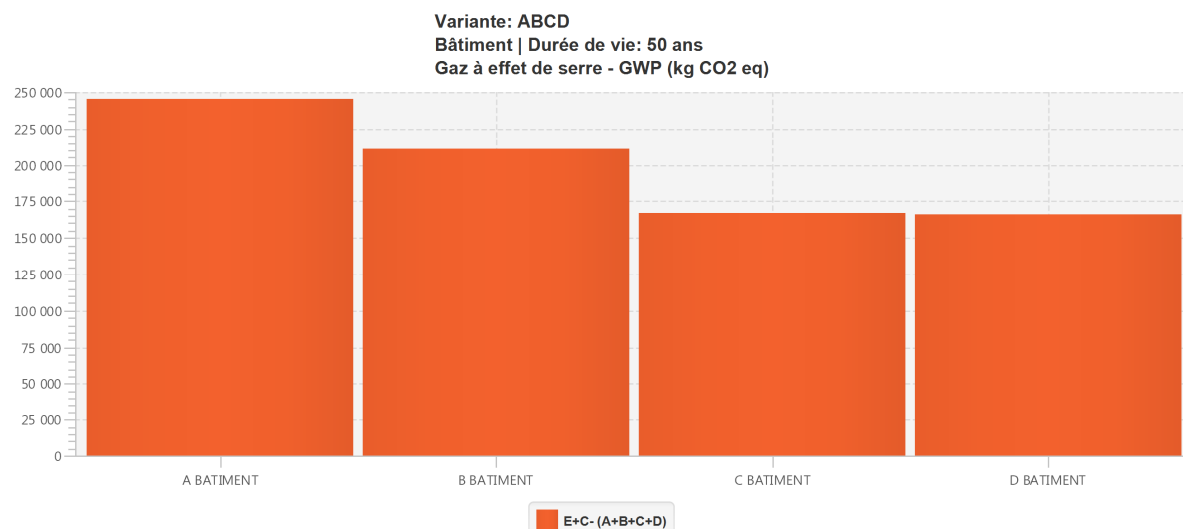


Figure 20: Emissions totale de GES selon les variantes constructives du bâtiment (total)

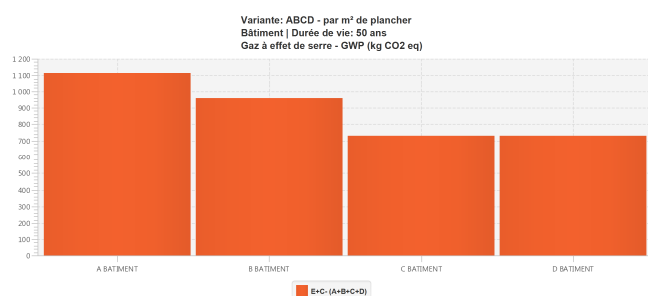


Figure 21: Emissions totale de GES selon les variantes constructives du bâtiment (par m²/SDP)

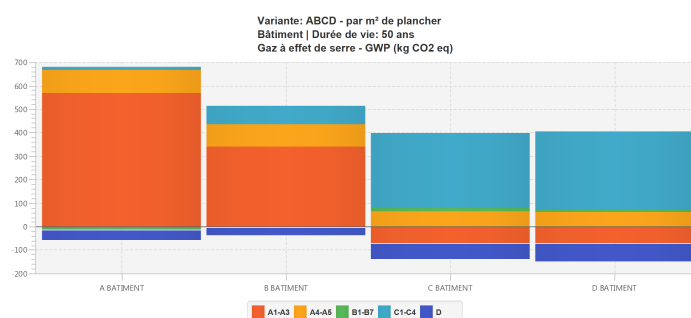


Figure 22: Emissions totale de GES selon les variantes constructives du bâtiment (par m²/SDP et phases du cycle de vie)

Variante: ABCD
Bâtiment | Durée de vie: 50 ans
Energie p. non renouv. - PENRT (MJ)

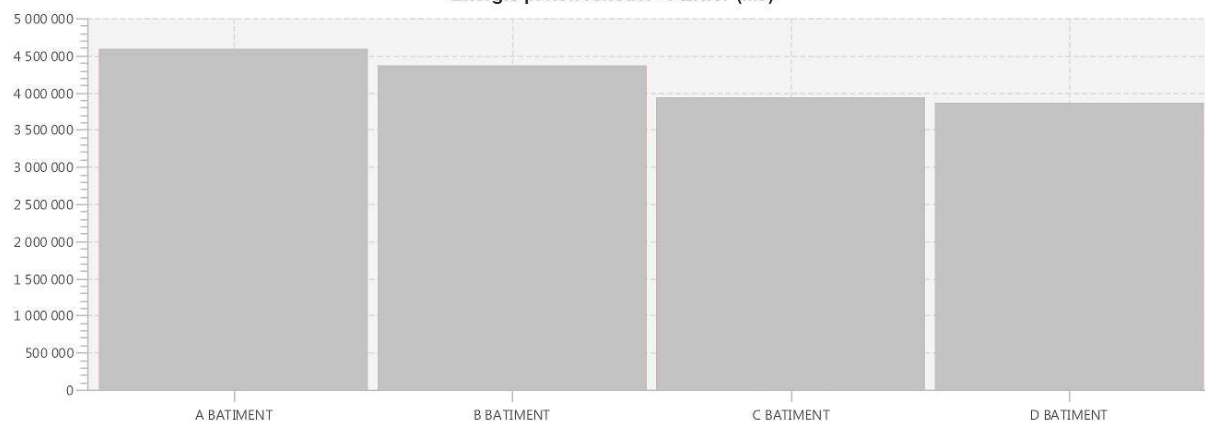


Figure 23: Consommation totale d'énergie grise selon les variantes constructives du bâtiment

5.4. Type de ressources mobilisées par variantes constructives (en volume et en poids)

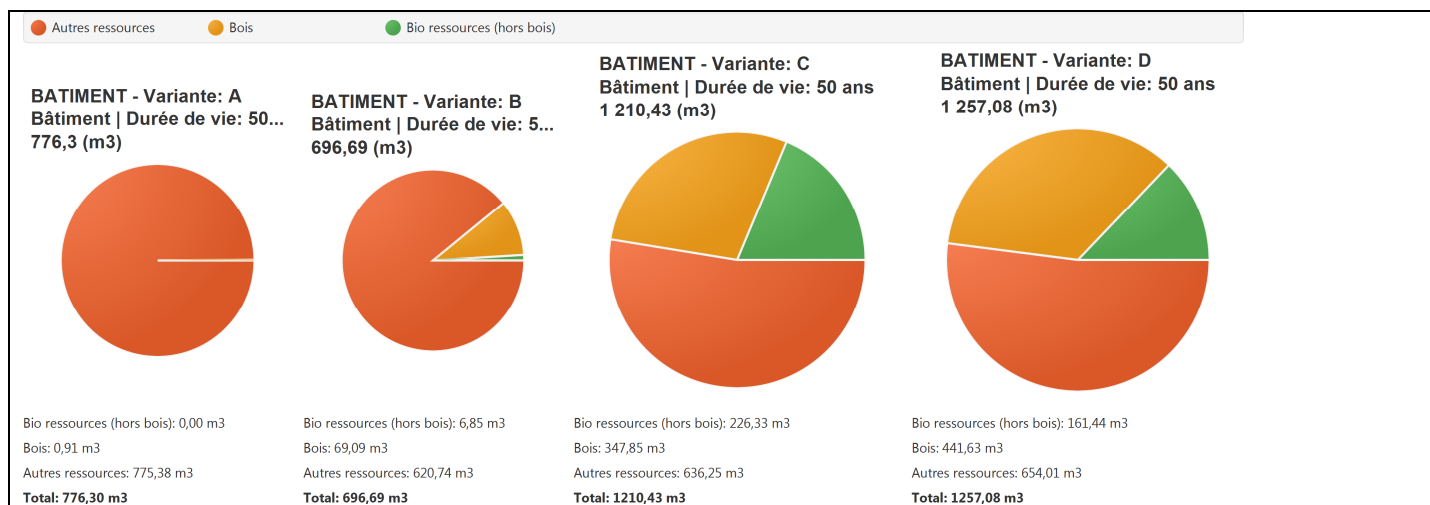


Figure 24: Type de ressources mobilisées selon les variantes constructives du bâtiment (en m3)

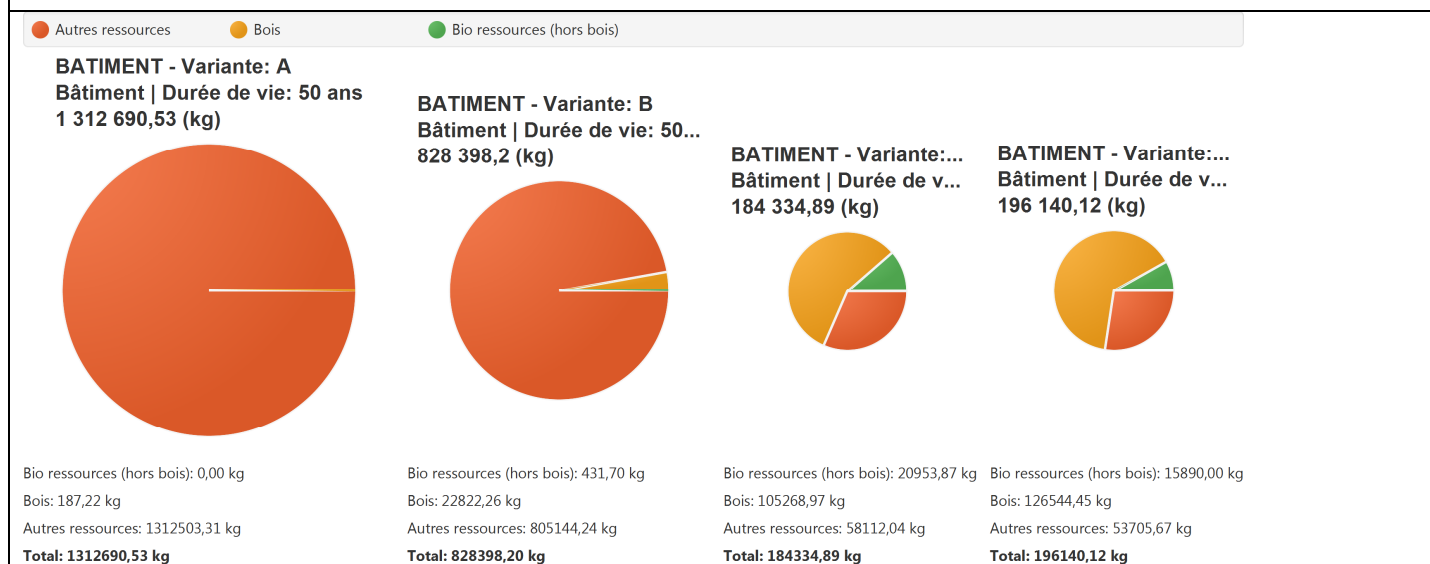


Figure 25: Type de ressources mobilisées selon les variantes constructives du bâtiment (en kg)

6. Consommations énergétiques et Label E+C-

Les consommations énergétiques liées à l'usage du bâtiment ont été modélisées selon les exigences du label E+C-.

A cette heure seule la configuration réellement construite (variante D) a été modélisée. Toutefois, une STD comparative va être réalisée afin de mesurer l'influence de l'inertie sur le confort sachant que bien qu'à structure bois, le bâtiment construit intègre des matériaux pondéreux (terre crue notamment).

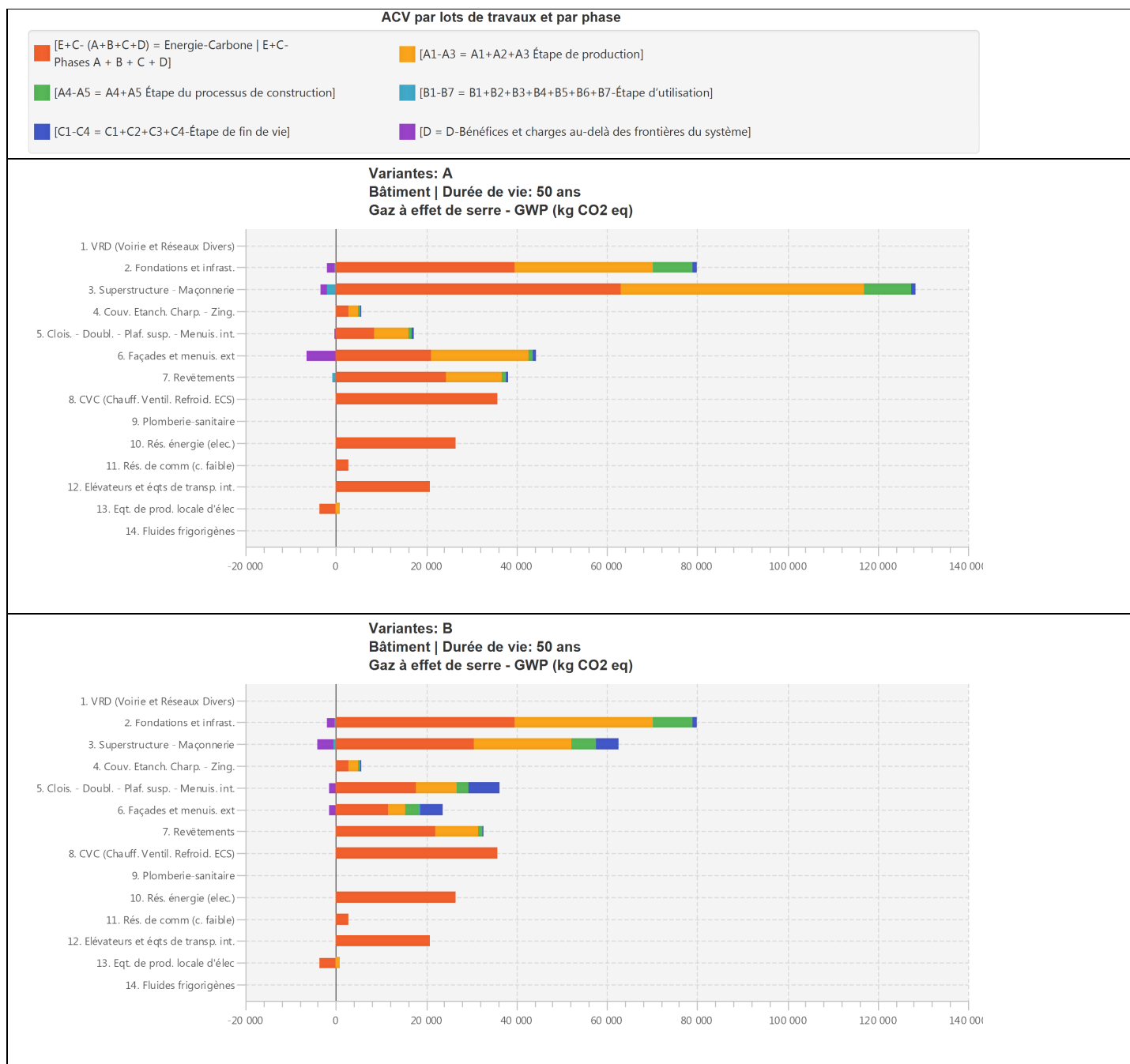
6.1. Bilan global E+C- à l'échelle du site.

Variante	A	B	C	D	Variante	A	B	C	D
Niveau	E3	E3	E3	E3	Niveau	non éligibl	C1	C1	C2
Bilan niveau énergie 1 et 2 (kWhEP/m²SRT/an)	19,3	19,3	19,3	19,3	E. Ges. Emissions GES (kg eq.CO2/m² SDP)	1193,19	1039,46	812,02	808,96
Bilan niveau énergie 3 et 4 (kWhEP/m²SRT/an)	5,3	5,3	5,3	5,3	E. Ges Pce Pdts const. et eqts (kg eq.CO2/m² SDP)	1131,55	977,83	750,39	747,33
					- dont matériaux	771,06	617,33	389,89	386,83
					- dont équipements	360,5	360,5	360,5	360,5
					- dont services	61,63	61,63	61,63	61,63
Seuils					Seuils				
Niveau Energie 1	134,2	134,2	134,2	134,2	Niveau carbone 1 (Eges max)	1730	1730	1730	1730
Niveau Energie 2	120,3	120,3	120,3	120,3	Niveau carbone 2 (Eges max)	870	870	870	870
Niveau Energie 3	100,3	100,3	100,3	100,3	Niveau carbone 1 mat* et eqts (Eges Pce max)	1050	1050	1050	1050
Niveau Energie 4	0	0	0	0	Niveau carbone 2 mat* et eqts (Eges Pce max)	750	750	750	750

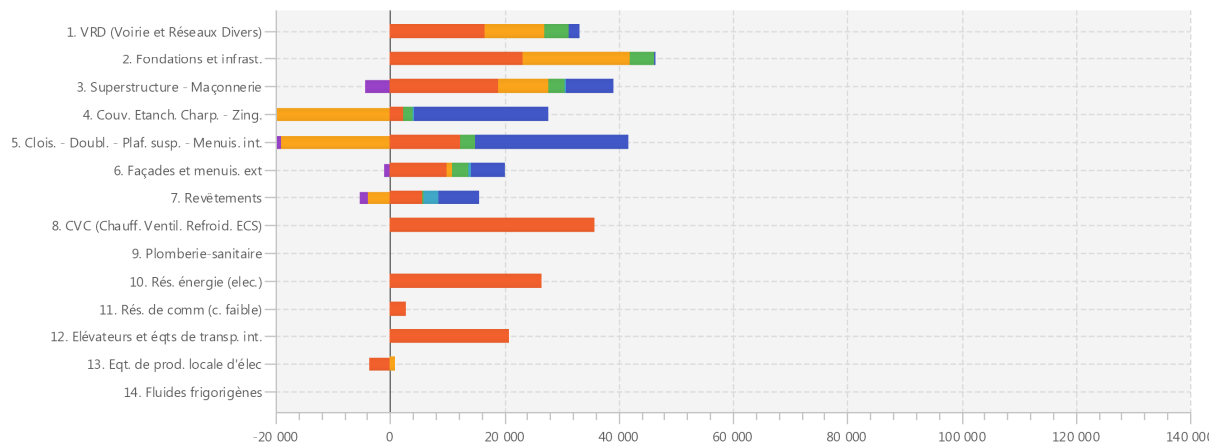
Figure 26 Niveaux E+C- selon les variantes (évalué à l'échelle de la parcelle)

6.2. Bilan E+C- par lots constructifs (à l'échelle du site)

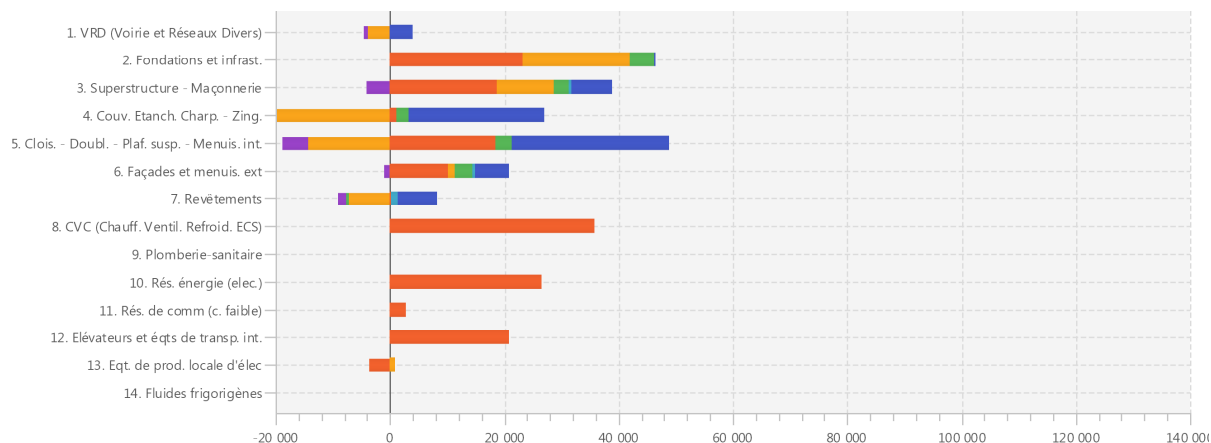
Attention sachant que les impacts des lots forfaitaires ne sont pas disponibles par phase, le « Total cycle de vie » est systématiquement affiché.



Variante: C
Site | Durée de vie: 50 ans
Gaz à effet de serre - GWP (kg CO2 eq)



Variante: D
Bâtiment | Durée de vie: 50 ans
Gaz à effet de serre - GWP (kg CO2 eq)



Conclusion

L'ACV des variantes constructives du bâtiment et de ses éléments confirment d'un point de vue environnemental la validité des choix de l'équipe de conception.

L'avantage de la solution construite (variante D) est donc :

- de 32% de GES dans les GES totaux, c'est à dire en prenant en compte les lots forfaitaires des équipements
- de 50% de GES concernant le seul poste des matériaux
- est la seule hypothèse à atteindre le niveau C2.

Impacts totaux (matériaux, équipements, service, énergie)				
Site kg eq CO ₂ / m ² SDP	A	D	ratio D/A	moins value A
ACV Avril	1193.19	808.96	68%	32%

Matériaux uniquement				
Site kg eq CO ₂ / m ² SDP	A	D	ratio D/A	moins value A
ACV Avril	771.06	386.83	50%	50%

La comparaison des éléments constructifs réalisée au § 3 a montré que d'un point de vue thermique, les solutions adoptées (variante D) sont a priori plus performantes que les solutions conventionnelles que ce soit en terme d'isolation thermique (résistance thermique) ou de confort d'été (déphasage thermique, inertie). Ceci est d'ailleurs confirmé par les études thermiques réalisées jusque-là.

L'utilisation du produit IPAC présente un intérêt certain compte tenu des qualités particulières de ce matériau (voir § 3.4, § 3.5, § 7.1).

L'utilisation massive de matériaux biosourcés peu transformés permet d'atteindre le niveau C2 du label E+C-

7. Annexe

7.1. ACV simplifiée du panneau alvéolaire IPAC®

Le panneau alvéolaire IPAC®, est issu à 95 % du recyclage. Il est essentiellement composé :

- d'une âme en carton ondulé ;
- d'une protection à base de polyéthylène recyclé de la marque Akilux ;
- de colle.

L'IPAC® a fait l'objet de plusieurs prototypes, testés dans des conditions réelles. Il a été sélectionné pour des constructions neuves et rénovations dans plusieurs projets en France (Rambouillet, Andrésy, Belle-Île, Kayserberg...).

Le produit est fabriqué en France dans des CAT.

Caractéristiques fournies par le fabricant :

- Conductivité thermique λ dynamique 0,03 W/mK
- Résistance une fois et demie supérieure à une ossature conventionnelle bois
- Densité : 143 kg/m³ / Effort de rupture : 34 200 Newton
- Affaiblissement aux bruits aériens des façades de 44 décibels
- Les panneaux sont recouverts d'une membrane Akilux issue du recyclage
- Les panneaux ne s'enflamment pas mais se consomment (Membrane classée M1).

A ce jour, le fabricant n'a pas réalisé de FDES de son produit. Nous avons donc réalisé une ACV simplifiée à partir :

- de données fournies par le fabricant ;
- d'inventaires de cycle de vie du carton fournies par le syndicat Européen des producteurs de carton ;
- de déclarations environnementales de produits en carton ;
- de données environnementales relatives à des produits à base de polyéthylène recyclé.
- d'une modélisation simplifiée du processus de production.

Les résultats de l'ACV simplifiée ont été intégrés dans la base de données du logiciel COCON-BIM.

La Figure 27 permet de comparer l'IPAC® à épaisseur identique des produits concurrents à base de produits recyclés et / ou biosourcés.

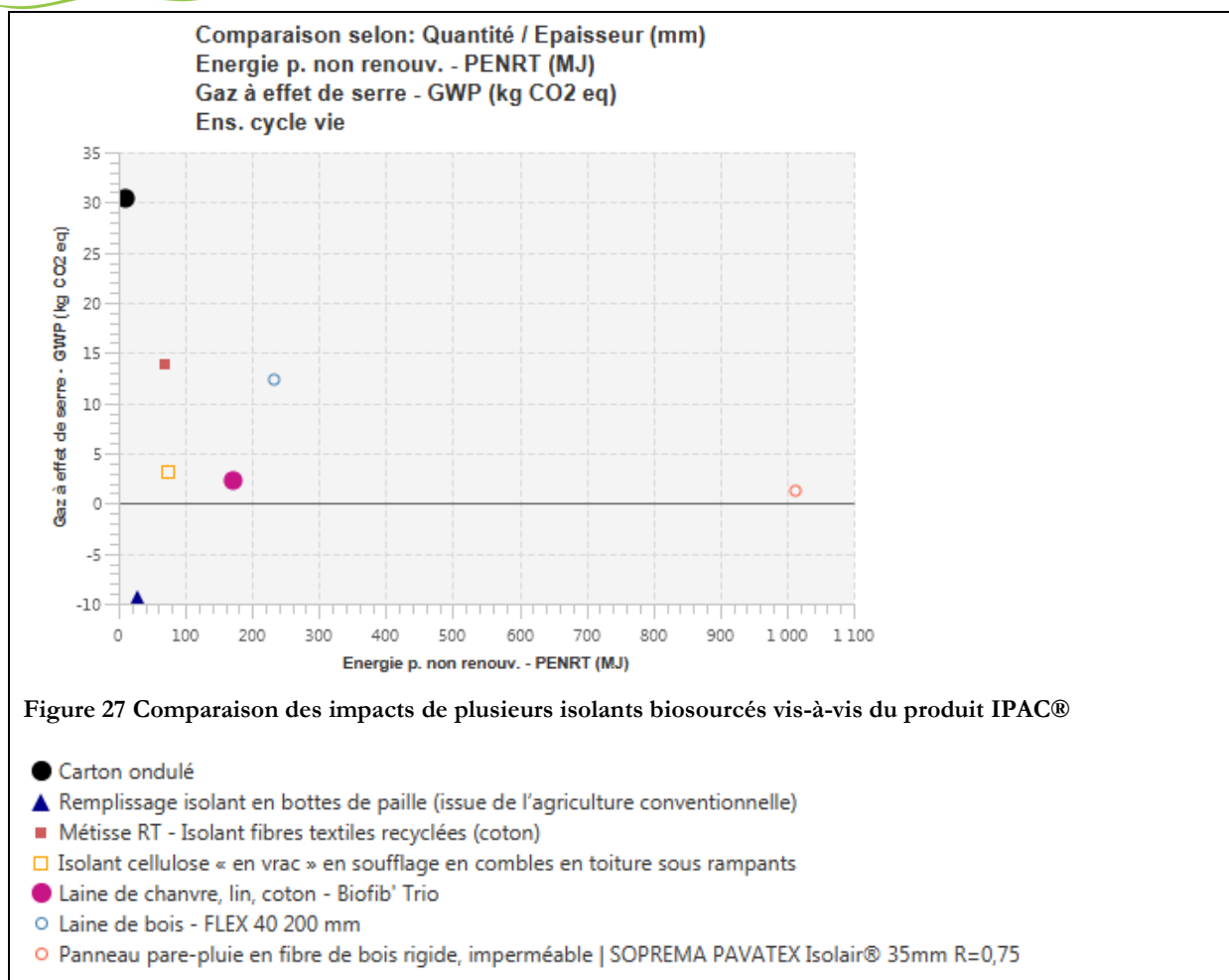
D'un point de vue environnemental, le bilan de l'IPAC est :

- très flatteur du point de vue de l'énergie grise.
- moins bon que ses concurrents biosourcés (mais qui sont eux même très performants).

On notera toutefois, que ces produits ne sont pas strictement comparables du point de vue de leurs caractéristiques techniques. Notons en particulier que l'IPAC est :

- rigide et porteur. Dans ce cadre seule la fibre de bois rigide peut lui être comparé (et encore de manière limitée);
- susceptible d'assurer le contreventement. Dans ce cadre aucun matériau présenté ici ne peut rivaliser avec lui !

En conclusion, on peut penser que l'IPAC® occupe une niche technique particulièrement intéressante en tant que matériau biosourcés à faible impact environnemental et susceptible d'assurer un rôle porteur ou de contreventement.



7.2. ACV simplifiée du lattis métallique nervuré - Nergalto® NGSE (doublage papier siliconé)

La réalisation d'enduits de plâtre en extérieur est généralement réalisée sur un lattis métallique nervuré. En France, le principal fabricant est la société « [Métal déployé](#) » qui propose plusieurs produits selon les applications visées.

Le produit NERGALTO® NGSE est adapté à une mise en œuvre extérieure dans une configuration de parement enduit sur lame d'air ventilée.

Caractéristiques fournies par le fabricant :

- Le NERGALTO® NGSE est utilisé exclusivement en extérieur.
- Son papier est siliconé donc plus résistant aux imprégnations d'eau. Particulièrement recommandé pour les maisons ossature bois. Son doublage papier lui confère trois avantages :
 - Protection de la maçonnerie, sans condensation dans l'isolant.
 - Une isolation thermique efficace garantie par le papier qui permet de laisser une lame d'air entre le support de base et l'enduit.
 - Une consommation réduite d'enduit : avec l'amélioration de la fixation du papier sur la feuille d'acier, l'utilisation d'enduit est amoindrie, le papier accrochant mieux la matière.
- Application de l'enduit réalisée par projection.
- Composition du produit
 - Matière : Acier DX51D galvanisé Z275 - 2 faces - selon NF EN 10143
 - Doublé papier siliconé
 - Format standard des feuilles : 2 500 mm x 600 mm ou 2000 mm x 600 mm
 - Poids : 1,4 Kg/m²
 - Épaisseur du feuillard : 0,3 mm
 - Épaisseur apparente : 8 mm - assurant une bonne rigidité

A ce jour, le fabricant n'a pas réalisé de FDES et il n'existe pas de MDEGD de ce type de produit.

Nous avons donc réalisé une ACV simplifiée :

- à partir des caractéristiques du produit fournies par le fabricant ;
- à partir de données environnementales de produits en acier galvanisé ;
- en négligeant l'impact du papier.

7.3. Comparaison de solutions constructives pour certains éléments de façade

Les évolutions des contraintes de la réglementation incendie limitent la masse combustible des éléments de façade des ERP. Les compositions de parois doivent donc être réalisées dans le respect des nouvelles règles en vigueur qui se traduisent notamment par :

- une exigence de protection au feu des isolants biosourcés placés derrière une lame d'air ventilée ;
- la limitation de la masse combustible des éléments de façade ;
- l'usage d'essences de bois réputées plus résistantes au feu que leurs homologues (mélèze de montagne notamment).

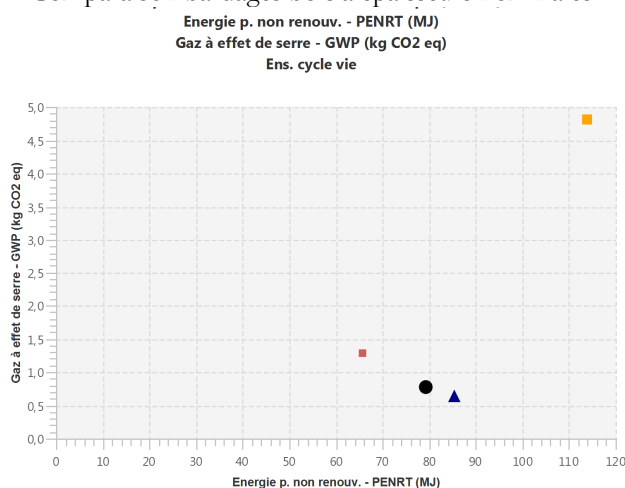
En accord avec l'équipe de maîtrise d'ouvrage des solutions de parement de façades sont comparées ici à partir d'un socle commun constitué d'une ossature bois à remplissage paille. La composition des parements est résumée ci-dessous.

Bardage bois en pin Douglas	Lame d'air ventilée	Plaque de plâtre de protection incendie
Bardage bois en multi-essence (dont Mélèze)		
Enduit de plâtre gros + lattis en métal		

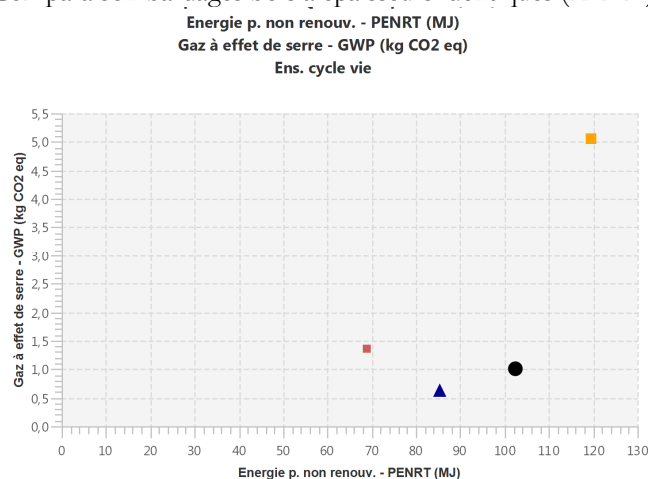
7.3.1. Comparaison de bardages bois

La Figure 27 permet de comparer plusieurs type de bardage bois qui sont disponibles sur le marché et dont les FDES sont en vigueur. On notera que l'épaisseur de ces produits varie selon les fournisseurs entre 17 et 22 mm (figure de gauche) mais que cela a peu de conséquences sur les impacts environnementaux estimés à épaisseur identique (figure de droite).

Comparaison bardages bois à épaisseurs nominales



Comparaison bardages bois à épaisseurs identiques (22 mm)



Libellé	▲	L.	Déclarants / ...	Ep. (mm)	Chgt. cl.	E. no renouv.
Bardage douglas non traité pour un usage de classes 2 et 3	●		Créaboïs	17.0	0.8	79.2
Bardage en lames de Douglas sans traitement de préservation	▲		France Dougl...	22.0	0.6	85.3
Bardage, en douglas français, avec et sans finition, fabriqué en France.	■		SIVALBP	21.0	1.3	65.7
Bardage, multiples essences, avec et sans finition, fabriqué en France.	■		SIVALBP	21.0	4.8	114.0

Figure 28: Comparaison de bardages en bois (GES / énergie grise) pour l'ensemble du cycle de vie

Le bardage « multiples essences » dont le fournisseur propose des produits qui permettent de respecter les nouvelles contraintes incendie présente un bilan environnemental moins flatteur que ses concurrents avec :

- des émissions de GES environ 3 fois supérieures aux produits en pin douglas ;
- des consommations énergétiques quasiment doublées par rapport à celles des autres produits examinés ici.

7.3.2. Comparaison d'une paroi isolée en paille avec parements en bois ou en plâtre gros.

L'une des solutions alternative à un bardage inflammable consiste à réaliser un parement ventilé enduit. Elle est donc examinée ici et la composition des parois modélisées précisée ci-dessous.

7.3.3. Bardage pin douglas+ Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV + Lambris

R. thermique (m2.K/W) :	9,0						
Déphasage Δt (h) :	21,34						
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	0,37						
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	15						
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K) :	177						
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,41						
	U.	Qté.	λ	Poids	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Sources
				kg/m²	kg. eq. CO2	MJ	
Bardage pin douglas	mm	17	0,130	10,75	+0,77	+79,20	DEP vérifiée
Lame d'air ventilée	mm	40	0,192	0,04			
Liteaux	x x	2000x40x40	0,150	1,63	+0,11	+4,40	DEP vérifiée
P. plâtre protect. feu	mm	12	0,190	13,20	+0,03	+0,47	DEP vérifiée
Bottes de paille	mm	370	0,052	32,01	-12,20	+35,47	DEP vérifiée
Ossature bois	x x	3000x370x45	0,150	25,49	+1,76	+68,64	DEP vérifiée
Pare vapeur	m2	1.0	2,300	0,70	+1,47	+38,64	MDEGD
Lambris	mm	18	0,012	9,20	+0,53	+65,60	DEP vérifiée
TOTAL				93	-7,53	+292,43	

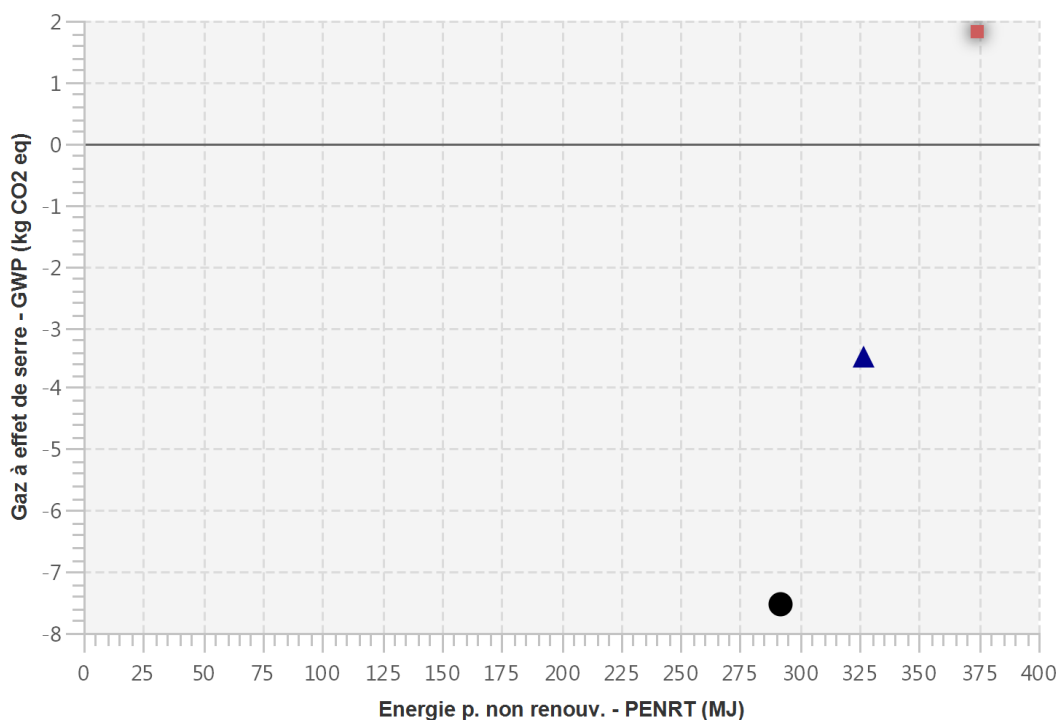
7.3.4. Bardage bois Mélèze + Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV + Lambris

R. thermique (m2.K/W) :	9,0						
Déphasage Δt (h) :	21,58						
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	0,35						
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	15						
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K) :	177						
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,41						
	U.	Qté.	λ	Poids	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Sources
				kg/m²	kg. eq. CO2	MJ	
Bardage bois Mélèze	mm	21	0,130	11,30	+4,82	+114,00	DEP vérifiée Sivalbp
Lame d'air ventilée	mm	40	0,192	0,04			
Liteaux	x x	2000x40x40	0,150	1,63	+0,11	+4,40	DEP vérifiée
P. plâtre protect. feu	mm	12	0,190	13,20	+0,03	+0,47	
Bottes de paille	mm	370	0,052	32,01	-12,20	+35,47	DEP vérifiée
Ossature bois	x x	3000x370x45	0,150	25,49	+1,76	+68,64	DEP vérifiée
Pare vapeur	m2	1.0	2,300	0,70	+1,47	+38,64	MDEGD
Lambris	mm	18	0,012	9,20	+0,53	+65,60	DEP vérifiée
TOTAL				94	-3,48	+327,23	

7.3.5. End. plâtre + Lattis métal + Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV + Lambris

R. thermique (m2.K/W) :	8,9						
Déphasage Δt (h) :	20,52						
Chaleur transmise vers l'intérieur (%) :	0,46						
Inertie quotidienne kJ/(m².K) :	15						
Inertie séquentielle 12 jours - kJ/(m².K) :	177						
Vol. produits biosourcés (m3/m²) :	0,39						
	U.	Qté.	λ	Poids	GES (GWP)	E. Grise (PENRT)	Sources
				kg/m²	kg. eq. CO2	MJ	
Enduit plâtre gros	mm	10	0,400	8,00	+1,24	+26,10	DEP vérifiée
Lattis métal	m2	1.0	50,000	1,40	+4,22	+45,41	Métal déployé
Lame d'air ventilée	mm	40	0,192	0,04			
Liteaux	x x	2000x40x40	0,150	1,63	+0,11	+4,40	DEP vérifiée
P. plâtre protect. feu	mm	20	0,250	18,80	+4,70	+90,50	DEP vérifiée
Bottes de paille	mm	370	0,052	32,01	-12,20	+35,47	DEP vérifiée
Ossature bois	x x	3000x370x45	0,150	25,49	+1,76	+68,64	DEP vérifiée
Pare vapeur	m2	1.0	2,300	0,70	+1,47	+38,64	MDEGD
Lambris	mm	18	0,012	9,20	+0,53	+65,60	DEP vérifiée
TOTAL				97	+1,83	+374,76	

D'un point de vue environnemental, l'amélioration de la résistance au feu du complexe constructif se traduit par une augmentation des impacts environnementaux (Figure 29) que ce soit du point de vue des GES ou des consommations d'énergie grise.



L.	Libellé	Poids(kg)	Chgt. cl.	E. no renouv.	Tx mat. biosourcés (% poids)
●	D1 - Bard.pin douglas+ Oss. bois + P. silico-calcaire +...	93.02	-7.5	292.4	84.3
▲	D2 - Bard. bois Mélèze + Oss. bois + P. silico-calcaire ...	93.57	-3.5	327.2	84.4
■	D3 - End. plâtre + Lattis métal + Oss. bois + P. silico-...	97.27	1.8	374.8	69.5

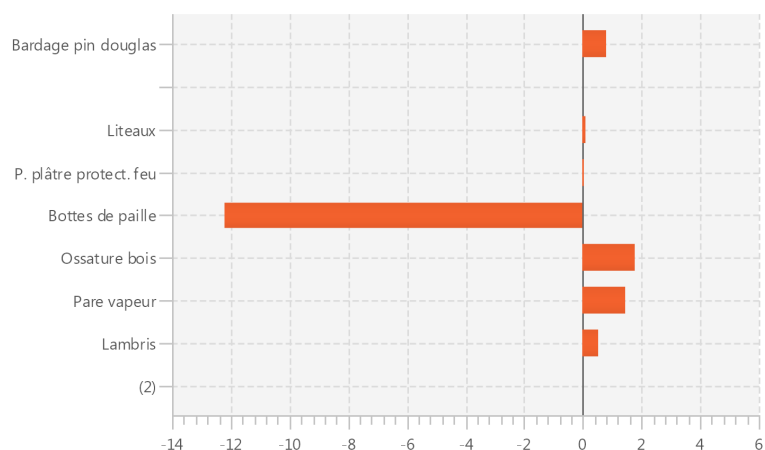
Figure 29: Comparaison (GES / énergie grise) d'une paroi isolée en paille avec parements en bois ou en plâtre pour l'ensemble du cycle de vie

Un examen couche par couche (Figure 30) montre que c'est le lattis en métal de support de l'enduit en plâtre qui est à le principal facteur d'augmentation des impacts environnementaux de la solution constructive à parement minéral.

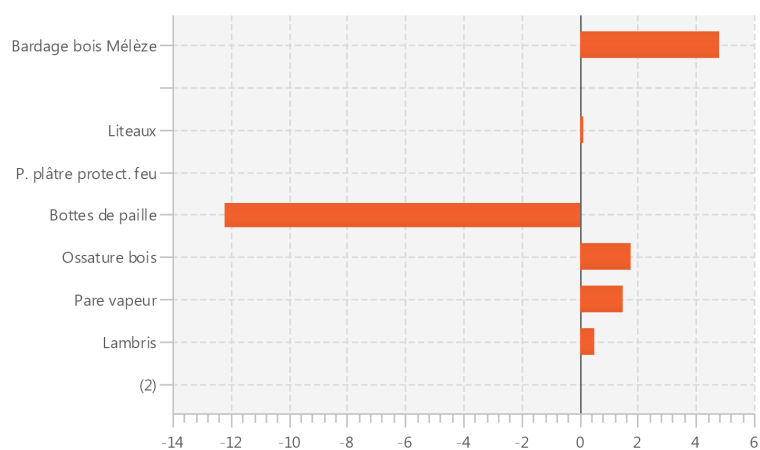
On notera toutefois, que les émissions de GES de la paroi la moins vertueuse (à parement minéral) se limitent à moins de 2 kg eq. CO₂/m² pour l'ensemble de son cycle de vie. Il s'agit donc d'en élément constructif dont le bilan environnemental reste très flatteur.

Alternative : afin d'améliorer le bilan environnemental du parement minéral, il est envisageable de remplacer le lattis en métal par un lattis biosourcé (bois, canisse, etc.). Toutefois, il conviendrait alors d'en vérifier la validité technique, assurantielle ainsi que le comportement au feu..

D1 - Bard.pin douglas+ Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV + Lambris
Gaz à effet de serre - GWP [-7,53 kg CO2 eq]



D2 - Bard. bois Mèlèze + Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV + Lambris
Gaz à effet de serre - GWP [-3,48 kg CO2 eq]



D3 - End. plâtre + Lattis métal + Oss. bois + P. silico-calcaire + Paille + FV ...
Gaz à effet de serre - GWP [+1,83 kg CO2 eq]

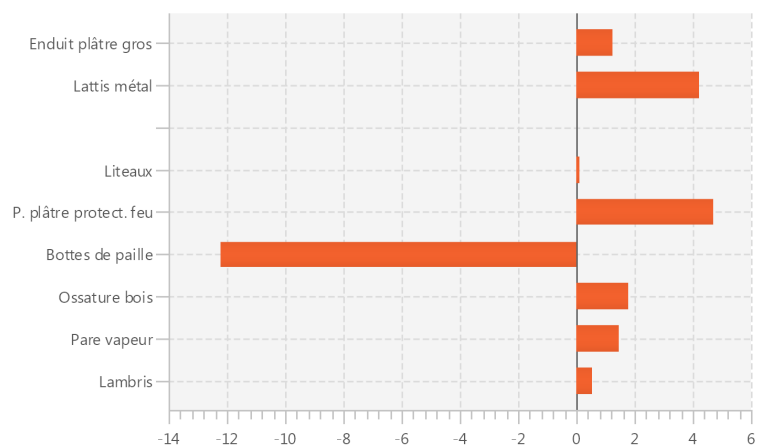


Figure 30: Comparaison (GES) couche par couche selon les parements en bois ou en plâtre d'une paroi isolée en paille pour l'ensemble de son cycle de vie

7.4. Couplage ACV Dynamique / Simulation Thermique Dynamique / Production énergétique dynamique

Sources

Nom	Titre	@
ADEME	Bilan GES : « Centre de ressources sur les bilans de gaz à effet de serre »	lien
LEVASSEUR Annie	Développement d'une méthode d'ACV dynamique pour l'évaluation des impacts sur le changement climatique.	lien
RFCP	FDES « remplissage isolant en bottes de paille »	lien
RTE	Réseau Transport Electricité	lien
PRG	Potentiel de réchauffement global	lien
23dd.fr	Site internet consacré au développement durable	lien

Contexte :

La mise en œuvre de politiques permettant de retarder / réduire / annihiler certaines émissions de GES va devenir de plus en plus prégnante, il est donc particulièrement important de :

- mesurer / modéliser correctement l'évolution des émissions GES, de leur PRG (Potentiel de Réchauffement Global) et de leur temps de présence dans l'atmosphère;
- identifier les leviers les plus efficaces pour limiter les contributions au changement climatique ;
- guider la conception des investissements immobiliers vers des solutions véritablement durables.

Les méthodes actuelle d'ACV « classiques » donnent une vision statique des impacts environnementaux et tout particulièrement des émissions / stockage de GES. Ceci présente (entre autres) des faiblesses du point de vue de la prise en compte:

- du cycle particulier du carbone dans les matériaux d'origine végétale ;
- de la valorisation des atouts environnementaux du réemploi ;
- des évitements d'émissions de GES procurés par les équipements de production locale d'énergie.
- de la variabilité temporelle du PRG de chaque type de gaz à effet de serre (et donc par ricochet du choix des matériaux et de l'organisation de leur fin de vie)..

Une vision plus proche de la réalité peut être obtenue en couplant :

- des STD (Simulations Thermiques Dynamiques) représentatives du fonctionnement d'un bâtiment ;
- des modélisations dynamiques des productions énergétiques locales (panneaux PV par exemple) ;
- du fonctionnement dynamique du réseau de production électrique français ;
- des ACV (Analyses en Cycle de Vie) dynamiques de l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment.

Le couplage de ces méthodes peut participer à la sélection de matériaux et systèmes constructifs, valoriser les stratégies de réhabilitation et de réemploi, renforcer l'intérêt des équipements de production énergétique locaux.

7.4.1. Le cycle « particulier » du carbone dans les matériaux d'origine végétale.

Les végétaux ont le pouvoir de retirer du CO₂ de l'atmosphère durant leur croissance. Ce CO₂ est transformé en carbone et stocké à la fois dans la plante et dans le sol. A la récolte, une partie du carbone :

- reste dans le sol (via les racines et leurs échanges avec leur milieu),
- est déposé sur le sol (broyats, petites branches, etc.), y composte pour être ensuite partiellement stocké dans le sol,
- est stocké dans le matériau (tige de paille, tronc / branche d'arbre, etc.).

Durant la vie en œuvre du matériau (usage du bâtiment), le carbone reste stocké dans les matériaux du bâtiment.

Au moment de la fin de vie des matériaux plusieurs scénarii sont possibles :

- réemploi (le carbone reste stocké).
- compostage (une partie du carbone reste stockée).
- valorisation énergétique (le carbone repart dans l'atmosphère).

Exemple : ACV de 1 m² de remplissage isolant en bottes de paille pour une durée de vie de 50 ans - source - FDES.

- Selon une ACV statique, le bilan sur l'ensemble du cycle de vie du mur est un stockage de 14,11 kg (kg.eq CO₂ / m²).
- Selon une ACV dynamique un peu « simpliste » (Figure 31):
 - De la récolte à la fin de vie (soit jusqu'en 2050),
 - 54,05 kg. eq.CO₂ sont **stockés** dans le sol ou dans le matériau.
 - seulement 0,89 kg eq.CO₂ sont émis par la fabrication des bottes, le transport et la construction (0,63 + 0,14 + 0,12).
 - Le procédé constructif a donc **soustrait 53,15 kg eq.CO₂ de l'atmosphère** et ce jusqu'en **2050**.
 - En 2050, à la fin de vie du matériau :
 - Si les opérations de fin de vie prévues n'ont pas changées d'ici là alors 39,04 kg.eq.CO₂ seront réémis. **Le bilan fera donc apparaitre un stockage permanent de 14,11 kg.eq.CO₂.**
 - Si les pratiques / technologies évoluent ou que le bâtiment dure plus longtemps, ou que le matériau est réemployé, le stockage peut continuer.

Gaz à effet de serre - GWP (kg CO2 eq)								
A1	A2	A3	A4	A5	C1	C2	C3	C4
Prod.	Transp.	Fab.	Transp.	Construction	Déconstruction	Transp.	Trait.	Elimination
-54,05	0,00	0,63	0,14	0,12	0,00	0,22	38,64	0,18
-54,05		0,89			39,04			
-53,15								
-14,11								

Figure 31: ACV de 1m² de mur en bottes de paille

Conclusion : contrairement à une ACV statique, une ACV dynamique met en évidence la capacité des matériaux biosourcés à **stocker tout de suite et pour longtemps** des GES. Le bilan environnemental d'un bâtiment biosourcés peut s'en retrouver largement bonifié.

7.4.2. Valorisation dynamique des atouts environnementaux du réemploi

Le raisonnement est identique dans le cadre du réemploi que ce soit :

- pour un matériau biosourcé dont une partie du stock de carbone ne sera libérée qu'en fin de vie.
- pour tous les types de matériau puisque le réemploi :
 - évite d'utiliser un produit nouveau et l'ensemble de ses émissions associées (voir § 1.7) ;
 - repousse dans le temps les émissions de GES liés à la fin de vie.

7.4.3. Evitements d'émissions de GES procurés par les équipements de production locale d'énergie

Les équipements de production d'énergie renouvelable sont généralement faiblement émetteurs de carbone. Ceci est pris en compte de manière statique par des facteurs d'émissions de GES faibles pour chaque kWh produit. Cependant, la réalité est plus flatteuse... En effet, le mix de production électrique varie en permanence en fonction de la consommation qui est elle-même liée aux conditions climatiques, aux activités humaines, etc.

Ainsi, durant les périodes de forte demande en énergie (journées ouvrées en hiver par exemple, des centrales thermiques (charbon, gaz, fuel) peu vertueuses sont mises en route, des importations d'électricité sont faites auprès de nos voisins Européens. Le contenu CO₂ du kWh français grimpe alors (Figure 32).

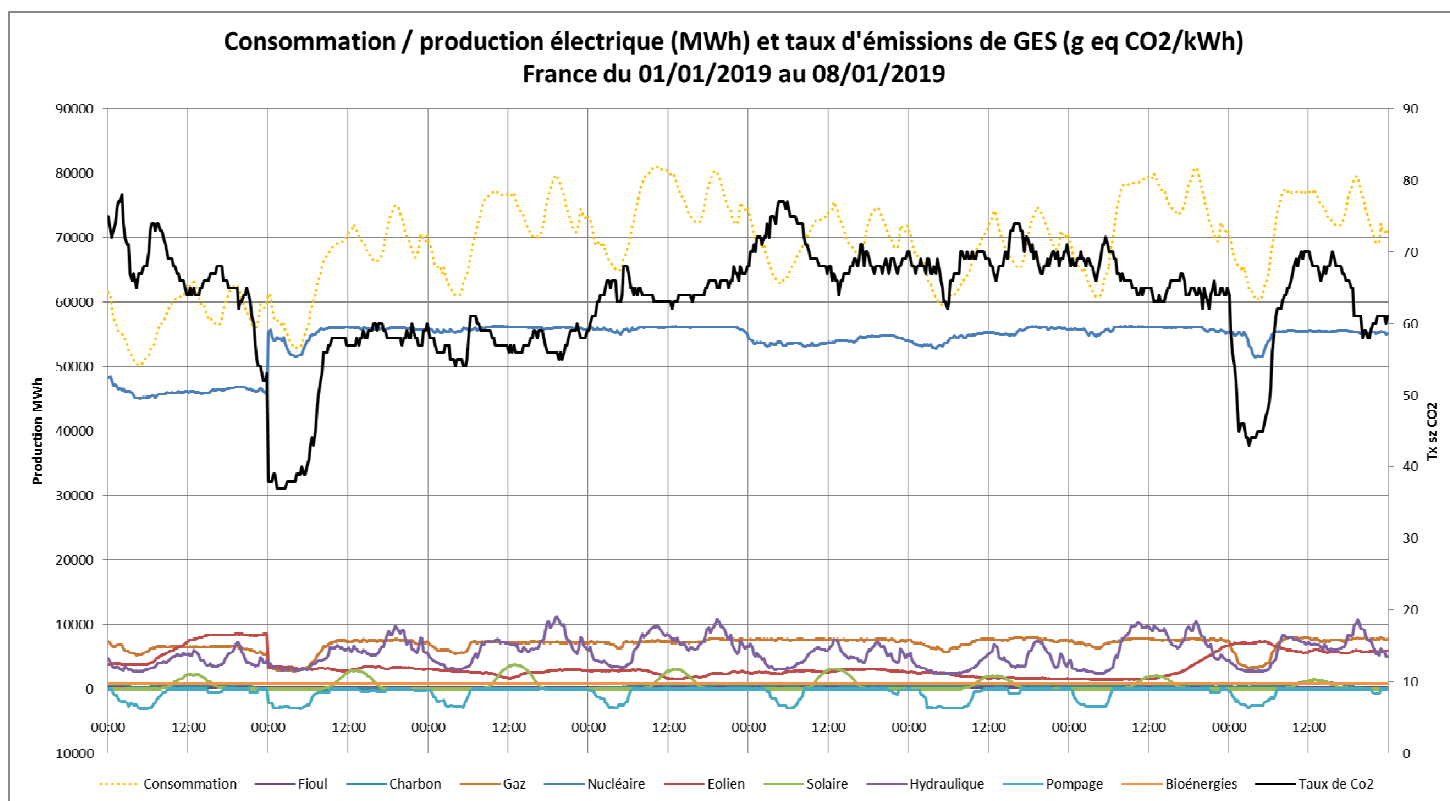


Figure 32: Consommation / production électrique et taux de GES de l'électricité début 2019 en France (calcul réalisé à partir de données RTE)

En phase de conception, pour un pas de temps très court (15 minutes par exemple),

- les STD permettent de modéliser (notamment à partir de statistiques climatiques):
 - les consommations énergétiques d'un bâtiment et de ses occupants ;
 - les productions énergétiques du bâtiment (PV par exemple).
- on peut modéliser à partir de statistiques RTE :
 - la charge du réseau électrique français
 - le contenu CO₂ du kWh issu du réseau.

Une ACV dynamique va alors permettre de mesurer :

- Les évitements de recours à des productions électriques peu vertueuses ;
- Les gains environnementaux de l'injection éventuelle d'électricité renouvelable produite par le bâtiment dans le réseau.

Le bilan environnemental d'un bâtiment à énergie positive pourra donc intégrer :

- L'amortissement environnemental des équipements de production d'énergie renouvelable de manière nettement plus favorable qu'en ACV classique.
- Mettre en évidence le « soulagement » de la charge du réseau électrique apportée par un BEPOS (Bâtiment à Energie Positive).

7.4.4. Variabilité temporelle du PRG de chaque type de gaz à effet de serre

Afin de faciliter la manipulation des données environnementales et leur compréhension, les impacts environnementaux sont regroupés en « indicateurs ». C'est le cas pour les GES (Gaz à Effet de Serre) qui sont convertis en équivalent CO₂ compte tenu de leur contribution au changement climatique et de leur durée de vie dans l'atmosphère (Figure 33). On notera que la durée de vie du dioxyde de carbone dans l'atmosphère étant estimée à environ 100 ans, son PRG vaut 1 puisque ce gaz est l'étalon de base pour l'ensemble des GES.

Gaz	Durée de vie (ans)	PRG Échelle considérée		
		20 ans	100 ans ⁴	500 ans
Méthane	12	72	25	7,6
Oxyde nitreux	114	289	265	153
PFC-14 (Tétrafluorure de carbone)	50 000	5 210	7 390	11 200
HFC-23 (Trifluorométhane)	260	9 400	12 400	10 000
Hexafluorure de soufre	3 200	15 100	23 500	32 400

Figure 33: Pouvoir de réchauffement global et durée de vie de quelques GES (source Wikipédia)

L'ACV dynamique permet de prendre en compte les différents émetteurs de GES et leur durée de vie dans l'atmosphère. Ceci est extrêmement important sur un plan politique car il est alors possible de mesurer le « moins mauvais moment » durant lequel émettre des GES et de promouvoir les stratégies associées.

7.4.5. Conclusion

L'ACV dynamique est un moyen puissant de mesurer les impacts environnementaux afin de se rapprocher autant que possible de la réalité. Ce type de démarche peut permettre de choisir les stratégies les plus adaptées pour atteindre le plus rapidement et durablement possible une neutralité carbone réelle.

Les pouvoirs publics semblent intéressés par ce type d'approche qui permet de mieux valoriser les atouts du bois et des matériaux biosourcés dans la construction.