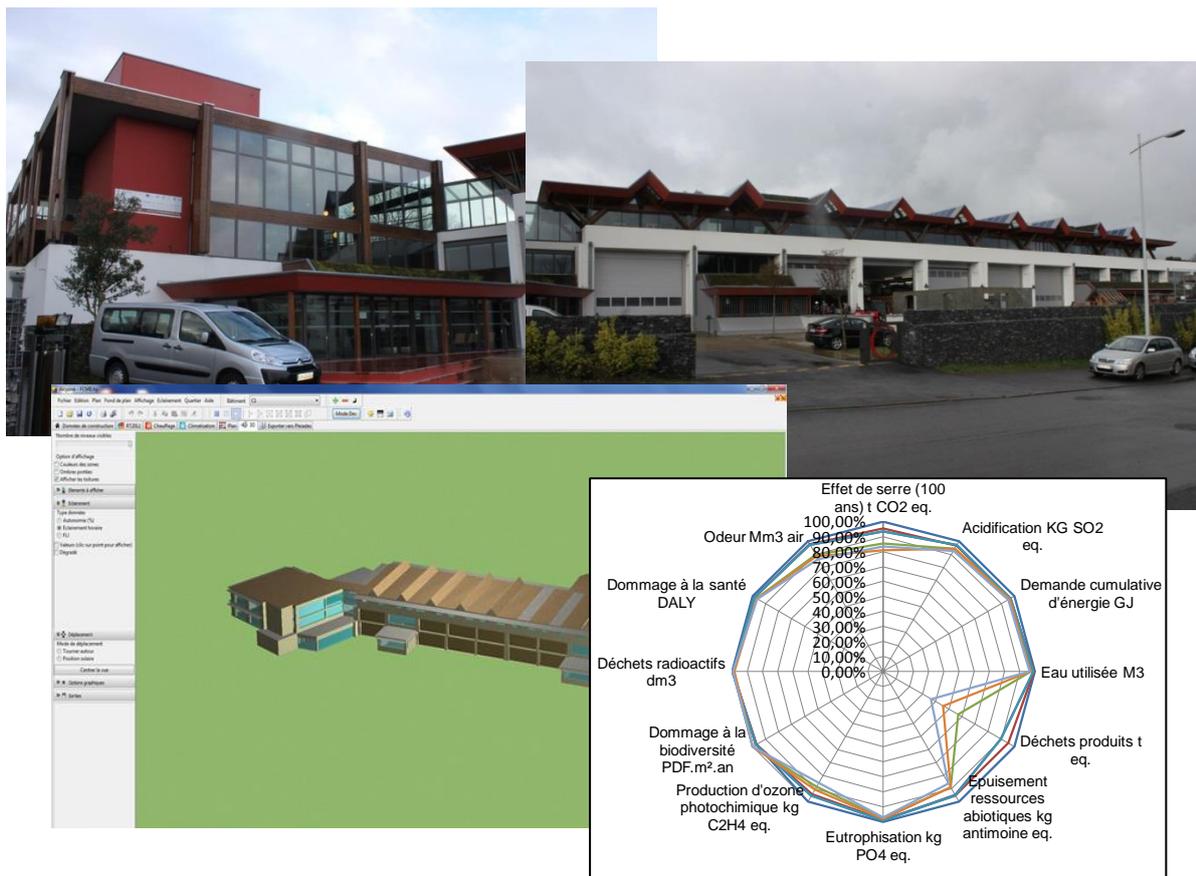


Evaluation environnementale par ACV d'actions d'économie de déchets proposées.

Hypothèses et résultats



Index

1. Introduction	3
2. Modélisation du bâtiment FCMB et des scénarios d'amélioration proposés	3
2.1. Hypothèses retenues pour l'ACV du bâtiment FCMB	5
2.2. Définition des scénarios d'amélioration et des variantes comparées.....	7
2.2.1. Scénario d'étude 1 : remplacement de la structure béton par une structure en acier (y compris bardages)	7
2.2.2. Scénario d'étude 2: simplification du système de toiture.....	9
2.2.3. Scénario d'étude 3 : modification de l'organisation fonctionnelle intérieure.....	10
2.2.4. Définition d'autres améliorations	12
3. Résultats de l'ACV	18
3.1. Comparaison des variantes et des scénarios	18
3.2. Evaluation de la variante améliorée avec les 3 scénarios ensemble.....	19
3.3. Evaluation du scénario 1.....	20
3.4. Evaluation du scénario 2.....	23
3.5. Evaluation du scénario 3.....	24
3.6. Conclusion générale.....	24
Annexe 1 : Présentation des outils logiciels utilisés	27
Annexe 2 : Compléments apportés au modèle thermique	38
Annexe 3 : Description détaillée du bâtiment.....	40

1. Introduction

Chacune des actions d'économie de déchets proposées pour le cas pilote a fait l'objet d'une évaluation environnementale suivant la méthodologie ACV définie dans le projet. Cette évaluation est réalisée dans la mesure du possible dans une logique comparative afin d'analyser l'économie de déchets réalisée au sens de l'ACV c'est à dire en considérant l'ensemble du cycle de vie y compris des étapes aval comme la réutilisation ou le recyclage (cf. livrable 2.1).

Par ailleurs il est essentiel dans ce type d'approche « mono-critère » de s'assurer du non transfert d'impact vers d'autres phases du cycle de vie du bâti ou à travers d'autres types d'impacts environnementaux. Ainsi l'analyse sera réalisée sur la base d'indicateurs de production de déchets mais aussi en intégrant d'autres types d'impacts environnementaux (consommation d'énergie, émissions de gaz à effet de serre, consommation de ressources, etc.) à travers des indicateurs spécifiques et reconnus. Cette « pondération environnementale » permettra au final de définir des priorités d'action pour l'économie de déchets et d'accentuer les recherches sur des points spécifiques pour lesquels la maîtrise des déchets serait encore trop faible ou mal évaluée.

La base Ecoinvent comporte des données sur un certain nombre de procédés de recyclage (métaux, papier, polystyrène, béton, plâtre, brique, laine minérale) ainsi que sur les procédés d'incinération et de mise en décharge. Ces données ont été utilisées, mais contextualisées afin de correspondre au contexte local du projet étudié (en particulier en ce qui concerne le mix de production d'électricité et les distances de transport). L'ACV permet alors d'évaluer les impacts évités par le recyclage, qui peuvent être comparés aux impacts supplémentaires liés par exemple à une plus longue distance de transport des déchets¹ (le nombre de sites de recyclage étant inférieur à celui des incinérateurs ou des décharges). Cette comparaison, sur une base multi-critères, constitue une aide à la décision pour le choix de mettre en œuvre une solution de déconstruction et de tri ou de gérer la fin de vie d'une manière plus traditionnelle.

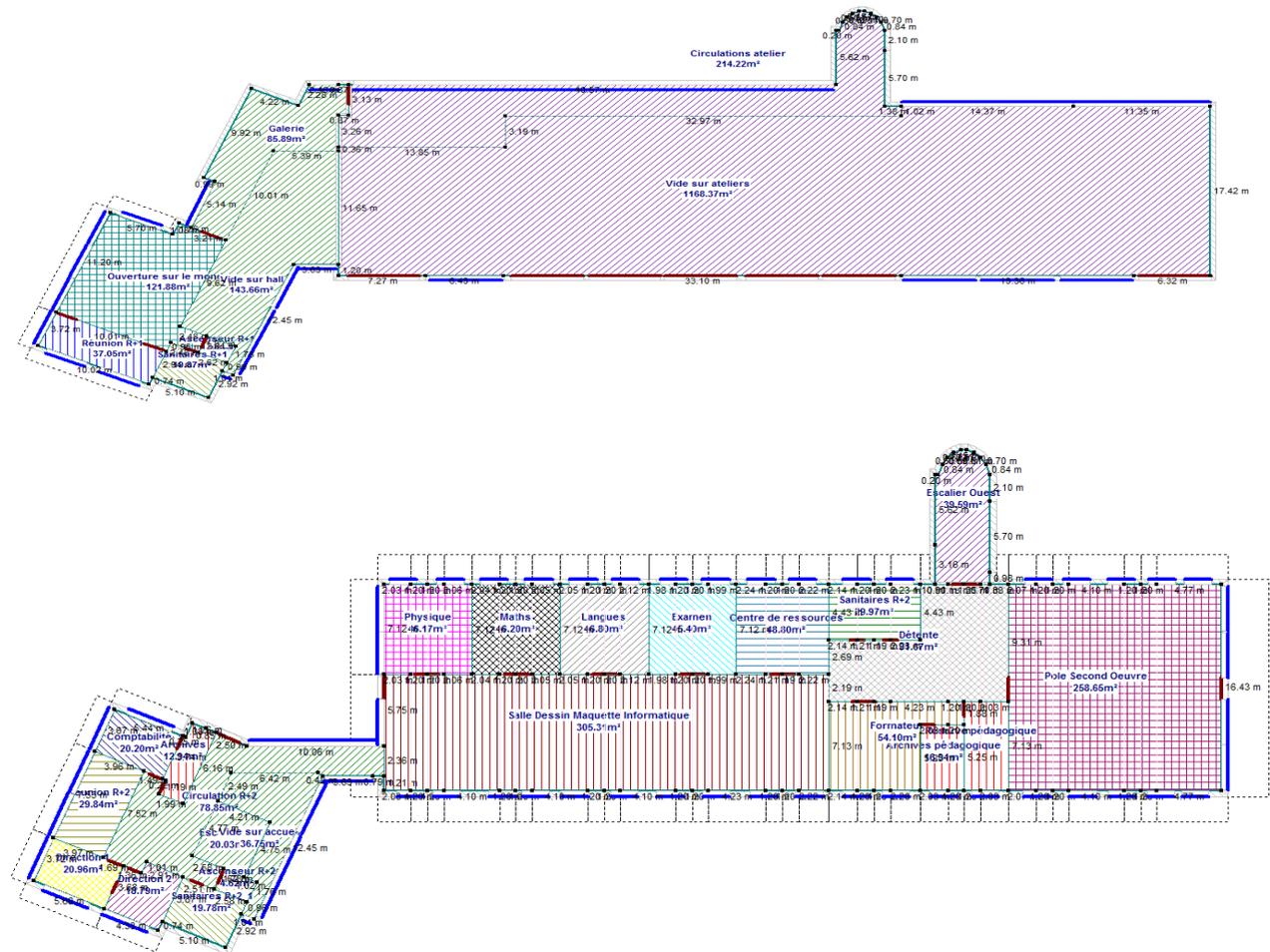
2. Modélisation du bâtiment FCMB et des scénarios d'amélioration proposés

Le bâtiment FCMB (Formation Compagnonnique des Métiers du Bâtiment), situé à Anglet (64) est un bâtiment collectif avec une surface hors d'œuvre nette (SHON) d'environ 5400 m². Il est composé de trois niveaux (rez-de-chaussée, 1^{er} étage, 2^{ème} étage).

L'évaluation des impacts environnementaux par ACV est effectuée avec l'outil **novaEquer** (cf. la présentation du logiciel en annexe 1) après l'intégration d'un module de calcul sur la réutilisation et le réemploi, complétant la simulation du cycle de vie existante. Un modèle graphique a été réalisé par le BET Climelec (Figure ci-dessous), qui a également effectué des simulations thermiques dynamiques.



¹ sur la base d'une distance totale de transport du bâtiment au recyclage, sans prendre en compte les opérations de déchargement et de chargement sur d'éventuelles plateformes intermédiaires.



Modèle 2D (de haut en bas : rez-de-chaussée, niveau R+1, niveau R+2)

Une durée intermédiaire entre 50 et 100 ans a été considérée : la quantité de déchets générée est bien entendu moindre si la durée de vie du bâtiment est augmentée. Ainsi l'unité fonctionnelle du bâtiment FCMB peut être décrite de la manière suivante :

Bâtiment tertiaire de 5394 m², à usage d'enseignement, sur 80 ans.

Le périmètre du système choisi pour l'étude contient l'ensemble des matériaux et composants du bâtiment durant son cycle de vie, les consommations d'énergie et d'eau durant la vie en œuvre du bâtiment sont également prises en compte.

2.1. Hypothèses retenues pour l'ACV du bâtiment FCMB

Le bâtiment FCMB avait été modélisé sous Alcyone et Pleiades (cf. la présentation des logiciels en annexe 1) pour une étude par simulation thermique dynamique. Certains composants ont un rôle négligeable en thermique, et n'ont pas été pris en compte dans ce modèle tels que la charpente, les réseaux électriques, les réseaux de plomberie, certains éléments de structure porteuse, mais ils ne peuvent pas être négligés en ACV. Certains éléments, comme par exemple le toit, ne correspondent pas à la description finale du bâtiment réel. Les CCTP (cahiers des clauses techniques particulières) ont alors été collectés pour compléter la modélisation du bâtiment. L'ajout et la modification d'éléments sont précisés en annexe 2.

Les principaux éléments d'enveloppe, sur lesquels portent les mesures de réduction de déchets, sont décrits dans le tableau ci-dessous. Le détail de la description du bâtiment est donné en annexe 3.

Type	Nom	Composition
Toitures	Toiture terrasse bac acier FCMB	Acier inox (0.1 cm) Laine de verre (20 cm) Plâtre (1 cm)
	Toiture terrasse non isolée béton	Feutre bitumeux (0.1 cm) Béton armé (acier 6%) (20 cm)
	Toiture terrasse isolée béton	Feutre bitumeux (0.1 cm) Polyuréthane TMS (4 cm) Béton armé (acier 6%) (20 cm) Laine de verre (20 cm) Plaque de plâtre 13 mm
	Panneaux bois + étanchéité + toiture végétale	Argile ou limon (8 cm) Feutre bitumeux (0.1 cm) Panneau de laine de bois (20 cm)
	Sud sheds	Acier inox (0.1 cm) Laine de verre (20 cm) Plâtre (1 cm)
Planchers bas	Plancher TP isolé UNIMAT SOL 70 mm	Carrelage (1 cm) Mortier (1 cm) Béton armé (acier 6%) (15 cm) Polystyrène expansé (10 cm)
Planchers intermédiaires	Pré-dalle béton + parquet pin massif	Bois lourd (2 cm) Béton armé (acier 6%) (27 cm)
	Plancher bois + parquet massif pin	Composition multiple: Bois lourd (9.9%) Bois lourd + laine de verre (85%) Plaque de plâtre 13 mm (5.1%)
Murs extérieurs	Murs béton plein 20 cm	Béton armé (acier 6%) (20 cm)
	Murs béton plein + pregymax 32 + BA 13	Béton armé (acier 6%) (20 cm) Polystyrène (10 cm) Plaque de plâtre 13 mm
Cloisons	Cloison interne BA 13+ LDV 45 mm+ BA 13	Plaque de plâtre 13 mm Laine de verre (4.5 cm) Plaque de plâtre 13 mm
	Murs béton plein + pregymax 32 + BA 13	Béton armé (acier 6%) (20 cm) polystyrène (10 cm) Plaque de plâtre BA 13 (1.3 cm)
Type ouverture- Menuiseries	Porte bois isolante performante	Porte bois isolante performante
	Fenêtre aluminium double vitrage	Fen bat alu rupt 4/16/4 S=0.15 Fen bat alu rupt 4/16/4 S=0.08
	Fenêtre aluminium simple vitrage	Fen bat alu SV
	Portail métallique	Portail métallique
Les réseaux	Réseaux électrique (fils)	Plastique PVC (52.8 kg) Cuivre (21.3 kg)
	Réseaux plomberie	Cuivre (58.8 kg)
	Réseaux plomberie PVC	PVC (64.2 kg)
Equipement	Panneaux photovoltaïques sur partie inclinée sud	PV polycristallin (241 m ²)
Charpente	Poteaux en bois	Poutre en bois certifié (174 m ³)
Structure porteuse	Portique / poteaux / poutres	béton (179 t)
Etat de surface	Peinture blanche	Peinture blanche
	Bitume	Couleur noire
	Végétaux	Végétaux (alpha = 0)

Tableau récapitulatif des principaux éléments du bâtiment

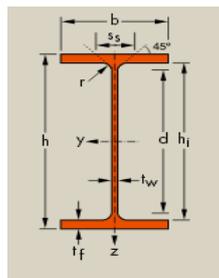
Le traitement en fin de vie de ces différents éléments dépend des scénarios considérés, décrits dans le § suivant.

2.2. Définition des scénarios d'amélioration et des variantes comparées

Afin d'évaluer l'approche 'zéro déchet', trois variantes sont proposées à partir de la description du bâtiment ci-dessus : une **variante "Bâtiment FCMB"** correspondant au bâtiment réalisé (taux de chute et filières de gestion de déchets optimisés), une **variante "standard"** où aucune mesure de réduction de déchets n'a été mise en œuvre (taux de chute plus élevés et scénario d'élimination uniquement), et une **variante "améliorée"** correspondant aux meilleures pratiques pour s'approcher du concept "bâtiment à zéro déchet". La variante "standard" sert de référence, alors que la variante "Bâtiment FCMB" prend en compte les actions d'économie de déchets correspondant au bâtiment réel, et la variante "améliorée" ajoute d'autres améliorations dans le but de correspondre aux meilleures pratiques envisageables actuellement. Pour définir la variante améliorée, trois scénarios ont été proposés par les partenaires du projet.

2.2.1. Scénario d'étude 1 : remplacement de la structure béton par une structure en acier (y compris bardages)

Ce scénario considère des poutres et poteaux métalliques au lieu d'éléments en béton, le plancher en béton est remplacé par un plancher sec, et un bardage en acier est mis en œuvre au lieu de béton armé au niveau des murs.



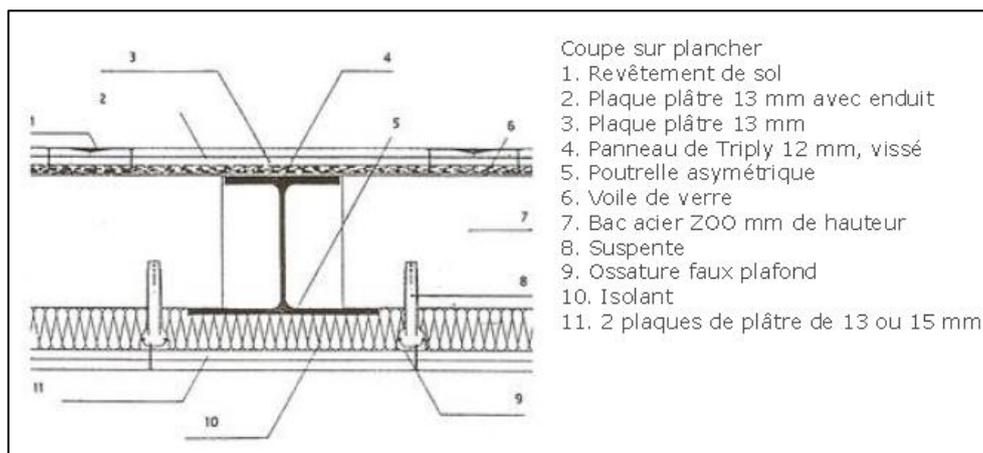
Géométrie des éléments de structure métallique

Type	Nombre	Gamme profilé					Longueur total (m)	Masse (tonne)	Traitement en fin de vie
		H (mm)	B (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	G (kg/m)			
Portique métallique HEA 800 (vertical, niveau atelier)	26	790	300	15	28	224	131,3	29,4	Recyclage
Portique métallique HEA 800 (horizontal, niveau atelier)	/	790	300	15	28	224	263,7	59,1	
Poteaux/poutres IPE 140 (verticaux, niveau administratif)	38	140	73	4,7	6,9	12,9	100,7	1,3	
Poteaux/poutres IPE 140 (horizontaux, niveau administratif)	/	140	73	4,7	6,9	12,9	265,1	3,4	

Types de poteaux et poutres en acier et devenir en fin de vie

La masse totale d'acier correspondante est de 93,2 tonnes.

Plancher sec: le choix d'un plancher sec est proposé au lieu de différents types de plancher qui font appel au coulage d'une dalle en béton et comportent une phase humide (cette action ne concerne que certains planchers seulement, ceux en bois étant conservés). Le plancher sec est réalisé par l'assemblage mécanique de matériaux industrialisés (Figure ci-dessous) au lieu du plancher intermédiaire en béton (au niveau de l'atelier). La réutilisation ou le recyclage de ces composants, démontables, est ainsi facilité.



Plancher sec (largeur de laine de verre : 200 cm)

La composition du plancher sec est indiquée dans le tableau ci-dessous. Le choix des modes de traitement en fin de vie vise à atteindre des performances élevées en ACV sans être irréaliste, et à montrer que la méthode peut être appliquée à différentes options de fin de vie.

Composition	Traitement en fin de vie	Commentaire
Bois lourd 20 mm	80 % recyclage en panneaux de particules, 20% valorisation énergétique (incinérateur)	La démontabilité du système permet une séparation aisée des éléments et donc un taux de recyclage important. Il y a toutefois des pertes dans le process de démontage. Le réemploi pourrait être envisagé mais le nombre important de percements (vis) le rend difficile.
Plaque de plâtre 26 mm	85% recyclage, 15% décharge	Idem. Démontabilité = séparation des éléments = taux de recyclage élevé
Panneau de bois contreplaqué de 12 mm	80% recyclage en panneaux de particules, 20% valorisation énergétique (incinérateur)	Idem
Bac Acier (épaisseur: 1mm, hauteur: 200 mm) + poutrelle asymétrique (HE200B, G= 61,3 kg/m, h=200 mm, b=200mm, t _w =9 mm, t _f = 15 mm)	Recyclage	Le métal est recyclable à 100% lorsqu'il n'est pas lié à d'autres matériaux. Ce qui est rendu possible par la démontabilité.
laine de verre 22 cm	Réutilisation en comble perdu	
Plaque de plâtre 26 mm	85% recyclage, 15% décharge	Voir plus haut

Composition et devenir des éléments constitutifs du plancher sec

Les distances de transport des déchets considérées sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Distance moyenne de transport en fin de vie	20 km à l'incinérateur et à la décharge 40 km au recyclage sauf pour les plaques de plâtre : distance de 140 km
---	--

Elles sont affectées d'une incertitude importante (il est difficile de prévoir où seront situés les sites de traitement dans 80 ans), mais les impacts liés à ces transports restent très faibles dans le bilan global : par exemple, le transport d'une tonne de déchet sur 100 km génère dix fois moins de CO₂ que la fabrication d'une tonne de béton, et cent fois moins que la fabrication d'une tonne de verre. Les rapports correspondants pour les autres impacts sont indiqués dans le tableau ci-dessous. Il faut également noter que la plus grande part des impacts en termes de consommation d'énergie et d'eau correspond à la phase d'utilisation des bâtiments.

impact	unité	prod béton/transport	prod verre/transport
climat	kg CO2	8,1	92,9
énergie	kWh	0,7	21,0
acidification	kg SO2	2,9	49,0
smog	kg C2H4	2,7	250,7
eutrophisation	kg PO4	2,0	12,8
eau	m3	0,1	1,3
déchets	kg eq. Inerte	6,6	163,1

Bardage : de manière à respecter le parti architectural d'ensemble, l'élément en béton armé a été remplacé par un bardage en acier (épaisseur : 1 mm) au niveau des murs extérieur et des murs sur locaux non chauffés (LNC). La composition du mur avec bardage est la suivante:

Mur	Murs extérieur 1 & murs LNC	Murs extérieur 2
Composition	Bac acier (1 mm)	Bac acier (1 mm)
	Polystyrène (20 cm)	
	Plaque de plâtre 13 mm	
	Bac acier (1 mm)	

Composition du mur avec bardage

L'acier est supposé recyclé en fin de vie, le polystyrène incinéré avec valorisation énergétique.

2.2.2. Scénario d'étude 2: simplification du système de toiture

Compte tenu que la toiture actuelle engendre des découpes de vitrage importantes, il est proposé de la simplifier (cette simplification concerne la partie enseignement, cf. le livrable L2-2). Ainsi, le nombre de sheds passerait de 9 à 5. Leur forme serait modifiée (plus élargie et simplifiée). La surface de panneaux photovoltaïques ainsi que la toiture végétalisée seraient conservées (cf. Figure ci-dessous).



PRINCIPE DE FACADE MODIE

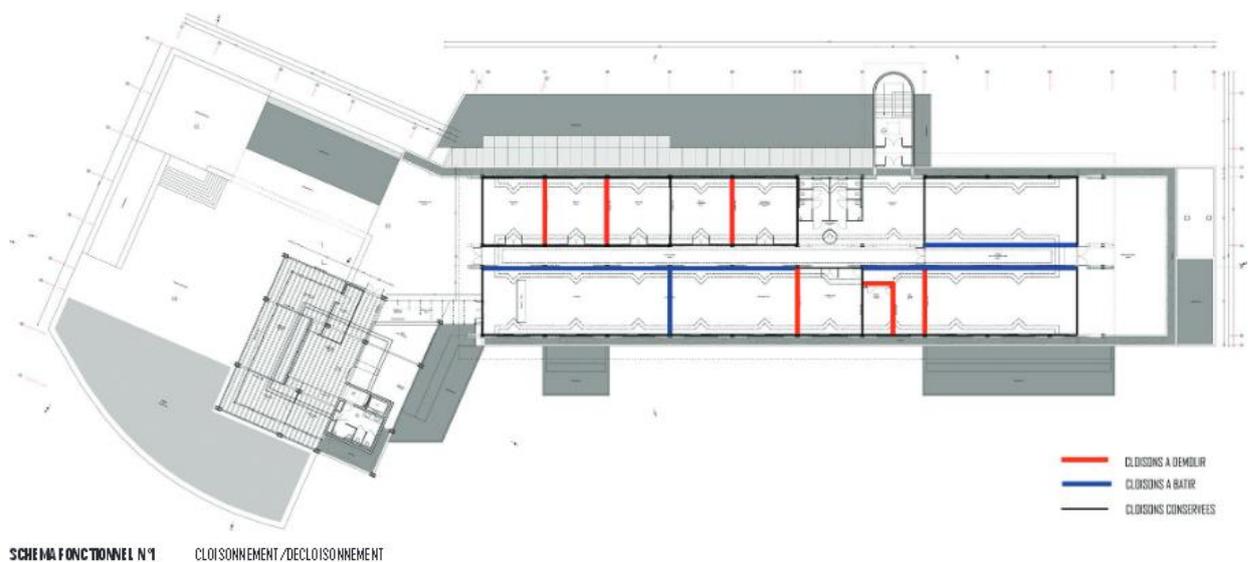
Simplification de la toiture (XB Architectes)

La forme de la toiture est modifiée dans l'interface Pleiades, qui alimente à la fois la simulation thermique dynamique et l'ACV. La composition de la toiture et la surface des panneaux photovoltaïques sont conservées à l'identique par rapport au bâtiment FCMB. Le scénario influence les besoins énergétiques, qui constituent également une entrée de l'ACV.

2.2.3. Scénario d'étude 3 : modification de l'organisation fonctionnelle intérieure

Le scénario présenté porte sur le cloisonnement intérieur : certaines cloisons fixes sont remplacées par des cloisons mobiles. L'objectif de l'ACV est alors d'évaluer la différence entre une variante avec des cloisons qui auraient dû être démolies et reconstruites en cas d'adaptation des locaux, et une variante avec des cloisons mobiles (sans reconstruction).

La configuration initiale (variantes standard et Bâtiment FCMB) correspond à la figure ci-dessous. Le scénario 3 répond aux mêmes besoins (unité fonctionnelle identique), en intégrant un scénario d'adaptation des locaux sur le cycle de vie du bâtiment. C'est sur la base de ce scénario que peut être évalué l'intérêt de cloisons mobiles par rapport aux cloisons fixes (qu'il aurait fallu démolir).



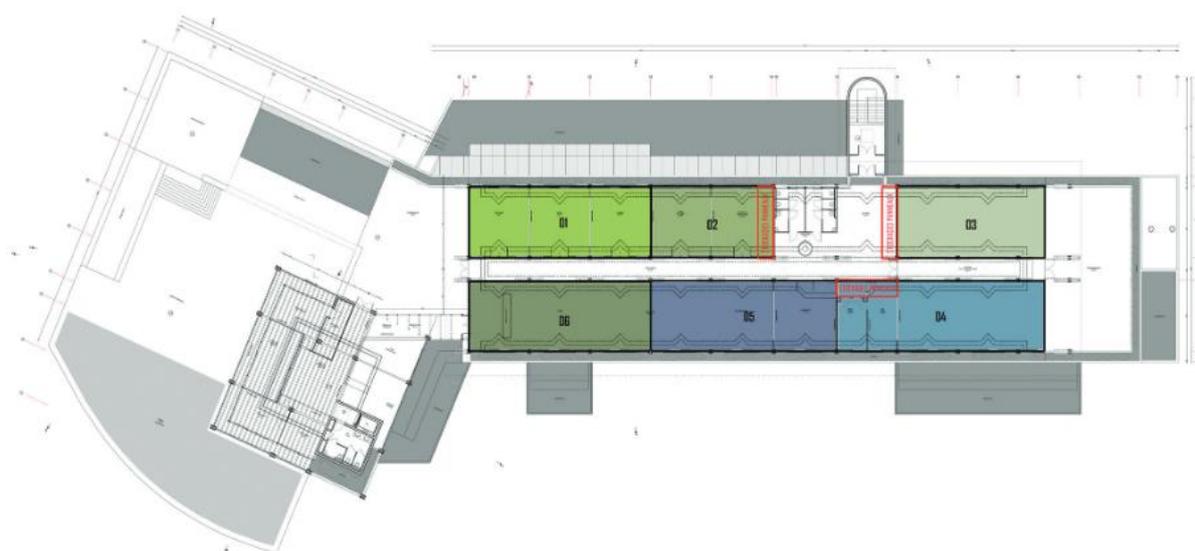
Cloisonnement intérieur pour les variantes standard et Bâtiment FCMB (XB Architectes)

La configuration initiale ci-dessus est considérée dans les variantes standard et Bâtiment FCMB, mais aussi dans les variantes améliorées correspondant aux autres scénarios. Dans le bâtiment initial, la configuration des cloisons ne contient que les cloisons conservées (en noir) et les cloisons à démolir (en rouge). Les cloisons conservées sont renouvelées une fois avant la fin de vie (50 ans). Les cloisons (en rouge) sont démolies et de nouvelles cloisons (en bleu) sont bâties. A la fin de durée de vie du bâtiment (80 ans), les cloisons (en noir et en bleu) sont démolies.

Type de cloisons	Compositions	Construction	Rénovation (au bout de 50 ans)	Démolition (au bout de 80 ans)
Cloisons conservées	Plaque de plâtre 13 mm Laine de verre (45 mm) Plaque de plâtre 13 mm	Construction neuve	Décharge / reconstruction	Décharge ²
Cloisons à bâtir	Plaque de plâtre 13 mm Laine de verre (45 mm) Plaque de plâtre 13 mm		Construction	Décharge
Cloisons à démolir	Plaque de plâtre 13 mm Laine de verre (45 mm) Plaque de plâtre 13 mm	Construction neuve	Décharge	

Composition et devenir des éléments constitutifs des cloisons pour les variantes standard et Bâtiment FCMB

Le scénario amélioré avec cloisons mobiles correspond au schéma ci-dessous.



SCHEMA FONCTIONNEL N°1

Scénario amélioré avec cloisons mobiles (XB Architectes)

Dans la version "cloisons mobiles" (Figure ci-dessus), 45 panneaux mobiles type classique de chez ALGAFLEX de dimension 1.00*2.50m sont ajoutés à la place des cloisons fixes. On suppose qu'ils ont une durée de vie de 100 ans³, ainsi la réutilisation de ces panneaux est favorisée en démolition du bâtiment (ce qui pose peu de problèmes pour des cloisons mobiles, facilement démontables en fin de vie). Par contre, les cloisons conservées auraient dû être renouvelées une fois lors de l'utilisation du bâtiment (non à cause de leur durée de vie, mais du fait d'une restructuration liée à l'usage des locaux), comme dans la variante initiale. Les éléments additionnels comme les rails sont supposés recyclés et les quantités étant faibles, les impacts correspondants ont été négligés dans les calculs.

² Il ne s'agit pas ici d'un scénario amélioré, comme dans le cas du plancher sec

³ La durée de vie effective dépend de l'utilisation (les cloisons s'usent davantage si on les déplace souvent), ce qui n'est pas pris en compte dans des fiches déclaratives issues de fabricants

Type de cloisons	Compositions	Construction	Rénovation (au bout de 50 ans)		Démolition (au bout de 80 ans)
Cloisons conservées	Plaque de plâtre 13 mm Laine de verre (45 mm) Plaque de plâtre 13 mm	Construction neuve	Plaque de plâtre 13 mm: 15% décharge, 85% recyclage	Construction neuve	Plaque de plâtre 13 mm: 15% décharge, 85% recyclage
			Laine de verre: Réutilisation		Laine de verre: 70% Réutilisation, 30% décharge
Cloisons mobiles	Plaque d'aggloméré (16 mm) Laine de roche (68 mm) Plaque d'aggloméré (16 mm)	Construction neuve	/		Réutilisation

Composition et devenir des éléments constitutifs des cloisons pour la variante améliorée

2.2.4. Définition d'autres améliorations

Construction

L'impact environnemental de la construction intègre les impacts correspondant à la fabrication des matériaux y compris le surplus (chutes, partie du surplus de béton restant sur le chantier, éléments détériorés sur le chantier) ainsi que les impacts liés au transport des matériaux vers le chantier. Les hypothèses correspondantes sont indiquées dans le tableau ci-dessous. Les utilisateurs du logiciel ayant demandé de simplifier la saisie des données de manière à rendre l'ACV compatible avec les pratiques professionnelles, une valeur moyenne est considérée pour le surplus de matériaux sur le chantier de construction. Les quantités en jeu restent globalement faibles, et il est supposé qu'une valeur plus élevée sur un matériau est compensée par une valeur plus faible sur un autre. De plus, sur le chantier réel du bâtiment FCMB (soit la variante Bâtiment FCMB), des efforts ont été faits pour la réduction des déchets en phase chantier, par exemple : livraisons au juste à temps, réduction des emballages, calepinage, préfabrication, chantier propre (et donc mieux maîtrisé). Ce qui explique la réduction du taux de surplus par rapport à la variante Standard et un taux constant avec la variante améliorée.

Hypothèse	Variante standard	Bâtiment FCMB	Variante améliorée
Surplus de matériaux de construction	5%	2 %	2 %
Distance moyenne de transport lors de la construction	100 km	100 km	100 km
Scénario en construction	Tous les matériaux sont fabriqués en neuf	Tous les matériaux sont fabriqués en neuf	Tous les matériaux sont fabriqués en neuf

Hypothèses sur la phase de construction

Utilisation

L'impact de l'utilisation intègre le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS), la production et le traitement de l'eau, la production d'électricité. L'étude concernant la conception du bâti, les problématiques des déchets d'activités et de transport des personnes ne sont pas incluses dans le système considéré.

Hypothèse	Variante standard, Bâtiment FCMB et améliorée
Hypothèses générales	Durée de vie du bâtiment: 80 ans
mix de production de l'électricité	78% nucléaire 14% hydro-électrique 4% gaz 4% charbon 9% perte réseau électrique
Energie (chauffage et ECS)	Bois (biomasse), rendement = 0,87
Eau	Pour un centre scolaire, la consommation d'eau considérée est de 4 m ³ / élève/an en

	moyenne, soit 13 L/personne /jour, dont 5 L/personne /jour d'eau chaude. Le rendement du réseau d'eau est de 80%.
Déchets d'activité	Non pris en compte
Transport des occupants	Non pris en compte

Hypothèses sur la phase d'utilisation

Rénovation

Si la durée de vie de certains éléments est inférieure à celle du bâtiment, on les remplace pendant la période d'occupation du bâtiment. On considère que l'impact en phase de rénovation est la somme des impacts en construction et en fin de vie (le processus considéré étant le même qu'en phase de démolition, cf. le § suivant), multiplié par le nombre de rénovations. Par exemple, si les fenêtres ont une durée de vie de 30 ans, elles seront remplacées deux fois sur la durée de vie de 80 ans considérée. Si par ailleurs les tuiles ont une durée de vie de 50 ans et un bâtiment une durée de vie de 80 ans, il faut les remplacer au bout de 50 ans mais la durée de vie restante de cet élément est de 30 ans. Au bout des 80 ans, les tuiles ont une durée de vie restante de 20 ans, sur laquelle elles peuvent être réutilisées dans un autre bâtiment. La durée de vie des matériaux et composants a été estimée à partir de données issues de [IBGE⁴].

Dans notre modèle, on considère que les éléments ne seront plus remplacés au-delà de 90 pourcent de la vie du bâtiment. L'impact du transport vers le chantier pour les produits neufs et celui vers le centre de traitement en fin de vie sont pris en compte. Les hypothèses correspondantes sont précisées dans le tableau ci-dessous.

Hypothèse	Variante standard et Bâtiment FCMB	Variante améliorée
Durée de vie des portes et fenêtres	30 ans	30 ans
Durée de vie des revêtements	10 ans	10 ans
Durée de vie des équipements	20 ans	20 ans
Durée de vie d'autres matériaux	Voir tableau § suivant	Voir tableau § suivant

Hypothèses concernant la réhabilitation

Démolition

Les scénarios de traitement des déchets pour les trois variantes sont présentés dans le Tableau ci-dessous. Les impacts environnementaux de la phase de démolition incluent les impacts de la mise en décharge ou de l'incinération et l'impact évité en utilisant le recyclage ou la réutilisation. L'impact évité (cf. livrable 2.1) est la différence entre l'impact lié au processus de recyclage (ou de réutilisation) et la fabrication à neuf de l'élément, en intégrant le transport. Il peut être négatif, par exemple si la distance vers le lieu du recyclage est telle que les impacts générés par le transport ne peuvent plus être compensés par le recyclage.

L'intérêt des scénarios proposés dépend des hypothèses de fin de vie des matériaux, en particulier l'intérêt des scénarios 2 et 3 dépend, en valeur relative, de la fin de vie du béton. En effet les quantités de matière correspondant au toit ou aux cloisons sont faibles par rapport à la quantité de béton : si celui-ci n'est pas recyclé, alors le % de réduction de l'indicateur "déchets" sera faible. Or il est difficile de connaître avec précision le taux de recyclage du béton à la fin de vie du bâtiment (estimée ici à 80 ans). Une analyse de sensibilité a alors été menée sur ce paramètre : nous avons considéré deux scénarios extrêmes : 100% de mise en décharge, et 100% de recyclage du béton. Comme pour les autres procédés, la base de données Ecoinvent a été utilisée pour les procédés de fin de vie : il peut exister d'autres données, mais elles ne sont pas forcément élaborées selon la même méthodologie, ce qui risque de biaiser les comparaisons. La version 3 d'Ecoinvent permet, par exemple à des fabricants, de fournir des données sur les intrants et sortants de leurs procédés, et les impacts sont alors calculés dans Ecoinvent par la résolution d'un système matriciel harmonisé. Des données génériques sont utilisées car il est difficile de savoir, par exemple dans le cas d'une incinération qui aura lieu dans 80 ans, quelles seront les caractéristiques précises de l'incinérateur local.

⁴ IBGE - Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, "Prendre en compte le cycle de vie des bâtiments et de leurs composantes," Guide pratique pour la construction et la rénovation durable de petits bâtiment, Info fiche bâtiment durable Recommandation pratique MAT 13, Juillet 2010

Bâtiment FCMB				Variante standard	Bâtiment FCMB	Variante améliorée (scénario 1,2,3)	
Lot	Type (surface ou volume)	Composition (Pleiades)	DVT (ans)				
Charpente	Charpente (174 m ³)	Poutre en bois certifié	80	DIB (incinération sans récupération)	Incinération avec récupération	80 % bois concassé - valorisation matière 20% incinération avec récupération	
Structure porteuse	Structure porteuse	Portique / poteaux / poutres	80	Béton - Décharge	Béton -recyclage en agrégats	Béton – recyclage en agrégats Acier- recyclage	Scénario 1
Toiture	Toiture terrasse bac acier FCMB (921 m ²)	Bac acier	75	Recyclage	Recyclage	Recyclage	Scénario 2
		Laine de verre	50	Décharge	Décharge	70% Réutilisation 30% décharge	
		Enduit plâtre	40	Décharge	Décharge	Décharge (1)	
	Toiture terrasse non isolée (229 m ²)	Feutre bitumineux	25	Incinération sans récupération	Incinération avec récupération	Incinération avec récupération	
		Béton armé (acier 6%)	80	Décharge	Béton lourd-recyclage en agrégats Acier-recyclage	Béton-20% recyclage en agrégats 80% recyclage en béton Acier- recyclage	
	Toiture terrasse isolée (271 m ²)	Feutre bitumineux	25	Incinération sans récupération	Incinération avec récupération	Incinération avec récupération	
		Polyuréthane TMS	50				
		Béton armé (acier 6%)	80	Décharge	Béton lourd-recyclage en agrégats Acier-recyclage	Béton-20% recyclage en agrégats 80% recyclage en béton Acier- recyclage	
		Laine de verre	50	Décharge	Décharge	70% Réutilisation 30% décharge	
		Plaque de plâtre 13 mm	50	Décharge	Décharge	15% décharge 85% recyclage ²	
	Panneaux bois + feutre bitumineux + toiture végétale (813 m ²)	Terre	25	Décharge	Décharge	Impact négligé (réemploi supposé sur site)	
		Feutre bitumineux	25	Incinération sans récupération	Incinération avec récupération	Incinération avec récupération	
Panneaux de laine de bois		50					
Sud sheds (parties inclinées vers le sud) (263 m ²)	Bac acier (1 mm)	75	Recyclage	Recyclage	Recyclage	Scénario 2	
	Laine de verre 20 cm	50	Décharge	Décharge	70% Réutilisation 30% décharge		
	Plaque de plâtre 1 cm	40	Décharge	Décharge	Réutilisation (1)		

Plancher intermédiaire	Pré-dalle béton + parquet pin massif (Plancher LNC) (1491 m ²)	Bois lourd	25	Incinération sans récupération	Incinération avec récupération	80% bois concassé – valorisation matière 20% Incinération avec récupération	Scénario 1
		Béton armé (acier 6%)	80	Décharge	Béton lourd-recyclage en agrégats Acier-recyclage	Béton – 20% recyclage en agrégats 80% recyclage en béton Acier- recyclage	
	Plancher bois + parquet massif pin (administration) (253 m ²) Composition multiple	Bois lourd (24 cm) Bois lourd (2 cm)	25	Incinération sans récupération	Incinération avec récupération	80% bois concassé - valorisation matière 20% Incinération avec récupération	
		Laine de verre (22 cm)	50	Décharge	Décharge	70% Réutilisation 30% décharge	
		Plaque de plâtre 13 mm	50	Décharge	Décharge	15% décharge 85% recyclage (2)	
Plancher bas	Plancher TP isolé UNIMAT SOL 70mm (2118 m ²)	Carrelage	50	Décharge	Recyclage en agrégats	Recyclage en agrégats	
		Mortier	50	Décharge	Recyclage en agrégats	Recyclage en agrégats	
		Béton armé (acier 6%)	80	Décharge	Béton lourd-recyclage en agrégats Acier-recyclage	Béton-20% recyclage en agrégats 80% recyclage en béton Acier- recyclage	
		Polystyrène expansé	50 (4)	Incinération sans récupération	Incinération avec récupération	Incinération avec récupération	
Cloison	Cloison interne (772 m ²)	Plaque de plâtre BA 13	50	Décharge	Décharge	15% décharge 85% recyclage (2)	Scénario 3
		Laine de verre	50	Décharge	Décharge	70% Réutilisation 30% décharge	
		Plaque de plâtre 13 mm	50	Décharge	Décharge	15% décharge 85% recyclage (2)	
	Murs LNC (223 m ²)	Béton armé (acier 6%)	80	Décharge	Béton lourd-recyclage en agrégats Acier-recyclage	Béton- 20% recyclage en agrégats 80% recyclage en béton Acier- recyclage	Scénario 1
		Polystyrène	50	Incinération sans récupération	Incinération avec récupération	Incinération avec récupération	
		Plaque de plâtre 13 mm	50	Décharge	Décharge	15% décharge 85% recyclage (2)	

Mur extérieur	Murs extérieur (1651 m ²)	Béton armé (acier 6%)	80	Décharge	Béton lourd-recyclage en agrégats Acier-recyclage	Béton-20% recyclage en agrégats 80% recyclage en béton Acier- recyclage	Scénario 1
		Polystyrène	50	Incinération sans récupération	Incinération avec récupération	Incinération avec récupération	
		Plaque de plâtre 13 mm	50	Décharge	Décharge	15% décharge 85% recyclage (2)	
	Murs (596 m ²)	Béton armé (acier 6%)	80	Décharge	Béton lourd-recyclage en agrégats Acier-recyclage	Béton-20% recyclage en agrégats 80% recyclage en béton Acier- recyclage	Scénario 1
Etat de surface ⁵	Peinture blanche (8780 m ²)	Peinture blanche	10	Décharge	Décharge	Décharge	
	Bitume (484 m ²)	Bitume	10	Décharge	Décharge	Décharge	
	Végétaux ⁶ (813 m ²)	Végétaux (alpha = 0)	10	Zéro impact	Zéro impact	Zéro impact	
Menuiserie	Porte bois isolante performante (160 m ²)	Porte bois isolante performante	30	Incinération sans récupération	Incinération avec récupération	80% réutilisation 20% Incinération avec récupération	
	Fenêtre aluminium double vitrage (4/16/4, s=0.08) (271 m ²)	Fenêtre aluminium double vitrage	30	Décharge	Recyclage ⁷	20% recyclage 80% réutilisation	
	Fenêtre aluminium double vitrage (4/16/4, s=0.15) (368 m ²)	Fenêtre aluminium double vitrage	30	Décharge	Recyclage	20% recyclage 80% réutilisation	
	Portail métallique (212 m ²)	Portail métallique	30	Recyclage	Recyclage	Recyclage	
	Fenêtre aluminium simple vitrage (154 m ²)	Fenêtre aluminium simple vitrage	30	Décharge	Recyclage	20% recyclage 80% réutilisation	
Equipement	Panneaux photovoltaïques sur partie inclinée sud	Photovoltaïque incliné posé (polycristallin)	20	Décharge	Recyclage (3)	Recyclage (3)	

⁵ Les peintures ou certaines formes d'étanchéité ne sont pas séparées de leur support en fin de vie, et devraient donc suivre la même filière de traitement. Il serait possible de distinguer dans la modélisation la peinture sur bois et sur plâtre par exemple, pour leur attribuer des filières de traitement distinctes. Ceci étant les quantités sont faibles et pour simplifier la description du bâtiment, un état de surface unique a été considéré pour toutes les surfaces et les impacts en fin de vie sont assimilés à la mise en décharge.

⁶ L'impact de fin de vie des végétaux a été négligé, les quantités étant faibles et le CO₂ émis en fin de vie étant supposé compensé par le CO₂ absorbé durant la croissance des plantes.

⁷ Le modèle ne permet pas pour le moment de traiter séparément la menuiserie et le vitrage, ce pourrait constituer une amélioration si les utilisateurs acceptent le principe d'une saisie plus complexe.

	(241 m ²)					
Les réseaux	Réseaux électriques (fils)	PVC	50	Incineration sans récupération	Incineration avec récupération	Incineration avec récupération
		Cuivre	50	Recyclage	Recyclage	Recyclage
	Réseaux plomberie	cuivre	50	Recyclage	Recyclage	Recyclage
	Réseaux plomberie PP	PVC	50	Incineration sans récupération	Incineré avec récupération	80% réutilisation 20% Incineration avec récupération

Hypothèses sur la fin de vie des éléments de construction

- (1): Il n'y a pas de durée de vie restante pour la réutilisation, donc l'élément (plâtre) est pris en compte comme mis en décharge
 (2): Les déchets correspondant aux plaques de plâtre sont envoyés vers un centre de recyclage à bordeaux, avec une distance de 140 km.
 (3): Les données sur le procédé de recyclage des modules photovoltaïques n'étant pas disponibles, l'impact évité est considéré comme nul (hypothèse conservatrice)
 (4) : la durée de vie du polystyrène expansé est considérée de 50 ans, mais comme il est placé en-dessous du béton, on ne peut pas le déplacer pendant 80 ans, donc il n'y aura pas de rénovation jusqu'à la fin de vie du bâtiment.

Concernant la démolition du bâtiment, les éléments en bleu dans le tableau précédent sont indiqués comme démontables dans le descriptif du bâtiment réel. Comme ils sont fixés au béton lourd, le mortier et le carrelage ne sont pas démontés. Ils seront mis en décharge ou concassés et réutilisés en construction, selon la fin de vie du béton auquel ils sont fixés. Les scénarios 1, 2, 3 sont marqués en couleur afin d'identifier les différences. Les mêmes couleurs sont utilisées dans les graphes de résultats.

3. Résultats de l'ACV

3.1. Comparaison des variantes et des scénarios

Différentes variantes ont été comparées sur ce cas d'étude, en considérant différents scénarios pour la variante améliorée :

- La variante standard sans mesure de réduction des déchets (le recyclage se limite au traitement des métaux)
- Le Bâtiment FCMB où le recyclage a été déployé dans plusieurs postes (menuiseries, PV, béton armé, etc.)
- La variante améliorée avec différents scénarios :
 - Le scénario 1 dans lequel la structure béton est remplacée par une structure en acier (cf. § 2.2.1), les autres éléments en béton étant recyclés en fin de vie
 - Le scénario 1 sans le recyclage du béton
 - Le scénario 2 dans lequel la toiture est simplifiée et agrandie, le béton étant recyclé
 - Le scénario 2 sans le recyclage du béton
 - Le scénario 3 dans lequel le cloisonnement est modifié, en ajoutant des cloisons mobiles, le béton étant recyclé
 - Le scénario 3 sans le recyclage du béton
 - La variante améliorée avec les 3 scénarios ensemble, le béton restant étant recyclé
 - La variante améliorée avec les 3 scénarios ensemble sans le recyclage du béton

Pour mieux utiliser les résultats afin d'identifier les solutions les plus efficaces, plusieurs séries de variantes sont comparées:

Numéro	Variantes comparées	Objectif de la comparaison
1	la variante standard + le Bâtiment FCMB + la variante améliorée avec le scénario 1, 2, 3 (sans le recyclage du béton) + la variante améliorée avec 3 scénarios ensemble sans le recyclage du béton + la variante améliorée avec 3 scénarios ensemble	Evaluer et comparer toutes les propositions d'amélioration
2	la variante standard + le Bâtiment FCMB + la variante améliorée avec le scénario 1 sans le recyclage du béton + le scénario 1 avec le recyclage du béton	Evaluer le scénario 1
3	la variante standard + le Bâtiment FCMB + la variante améliorée avec le scénario 2 sans le recyclage du béton + le scénario 2 avec le recyclage du béton	Evaluer le scénario 2
4	la variante standard + le Bâtiment FCMB + la variante améliorée avec le scénario 3 sans le recyclage du béton + le scénario 3 avec le recyclage du béton	Evaluer le scénario 3

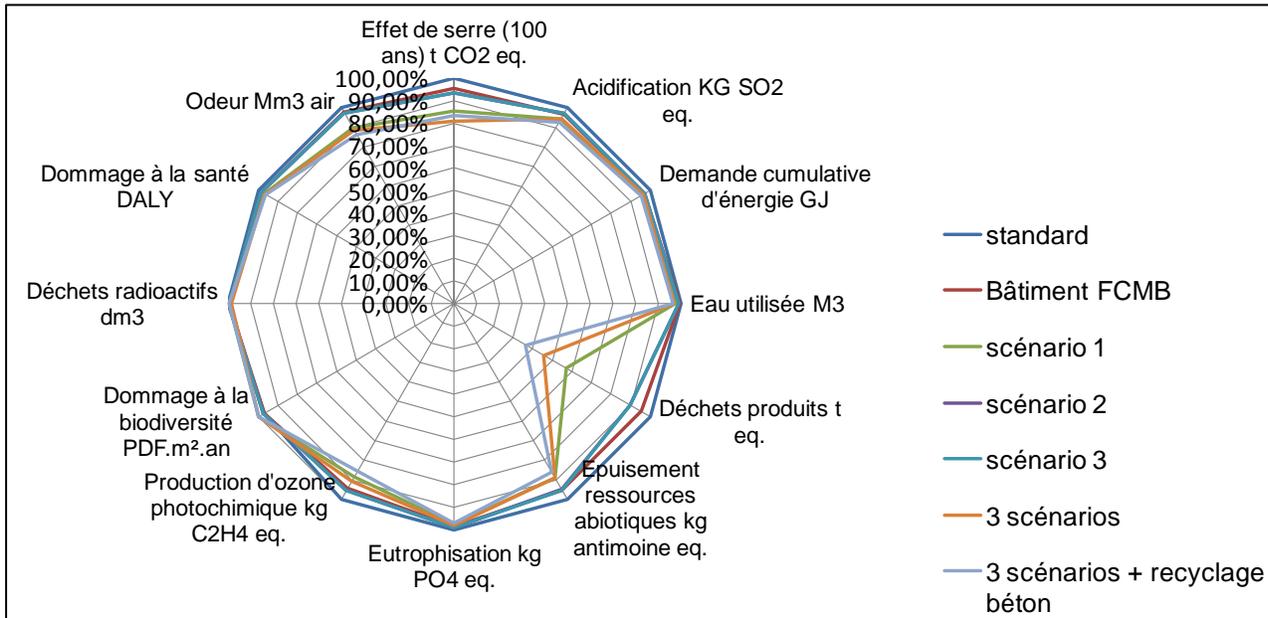
Liste des comparaisons effectuées

L'étude de cas vise dans un premier temps à illustrer la méthodologie d'ACV permettant d'évaluer des actions d'économies de déchets au sens de l'ACV, c'est à dire "cradle to cradle". Elle a ensuite pour objectif de comparer différentes démarches pour faire diminuer les déchets sur le cycle de vie. Parallèlement, il est essentiel de s'assurer du non transfert d'impact vers d'autres phases du cycle de vie du bâti ou à travers d'autres types d'impacts environnementaux. Ainsi l'analyse sera réalisée sur l'indicateur de production de déchets mais aussi en intégrant d'autres impacts environnementaux (demande cumulative d'énergie, émission de gaz à effet de serre, acidification, etc.)

Les résultats présentés dans ce rapport concernent douze impacts environnementaux, sur le cycle de vie total et sur chaque étape du cycle de vie. Ils sont présentés sous forme de radar ou d'histogramme.

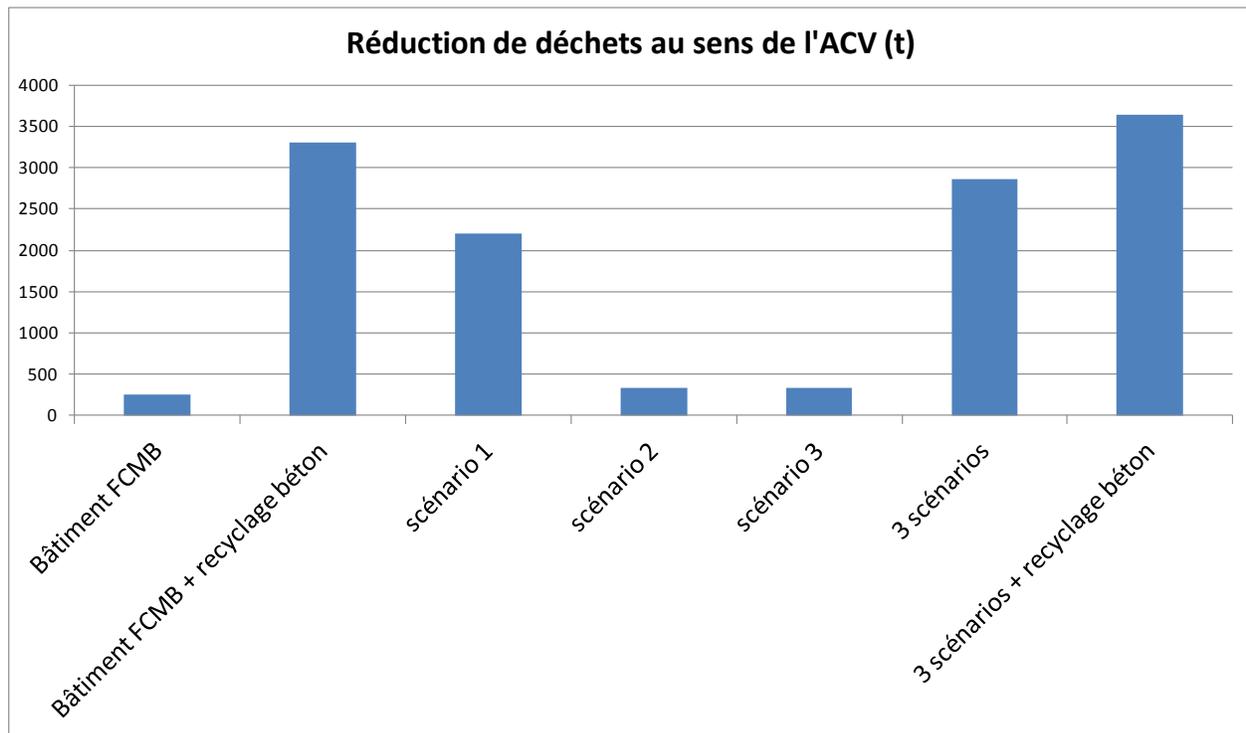
3.2. Evaluation de la variante améliorée avec les 3 scénarios ensemble

Dans un premier temps, les résultats sur le cycle de vie total pour les trois variantes et les trois scénarios (groupe comparatif n° 1) ont été comparés (Figure ci-dessous).



Résultats de l'ACV pour l'ensemble des variantes et des scénarios

On note un écart faible (4%) sur les déchets produits entre la variante standard et le Bâtiment FCMB. Ce résultat est logique car les actions d'économie de déchets au sens de l'ACV se limitent au recyclage de verre et au surplus moindre en phase de chantier (2% au lieu de 5%). En appliquant le traitement amélioré en fin de vie et en changeant la structure du bâtiment, les scénarios 1, 2 et 3 donnent une réduction de déchets relativement importante par rapport à la variante standard (43% pour le scénario 1, 10% pour le scénario 2 et le scénario 3). De plus, avec les trois scénarios ensemble et le recyclage du béton, on pourrait obtenir jusqu'à 64% de réduction de l'indicateur ACV.



Contribution de chaque mesure à la réduction des déchets au sens de l'ACV

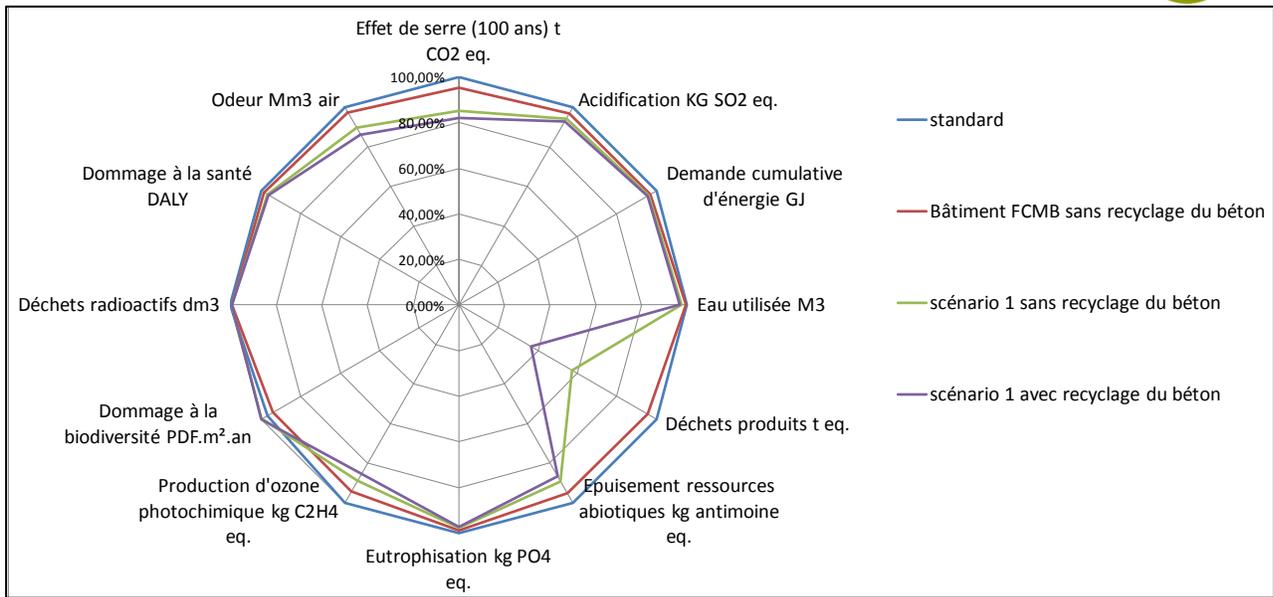
La Figure ci-dessus montre la contribution de chaque mesure à la réduction des déchets. On évalue également le Bâtiment FCMB avec un recyclage du béton. Les scénarios 2 et 3 donnent une réduction de déchets beaucoup moins importante que le scénario 1. La variante améliorée avec les 3 scénarios ensemble et le recyclage du béton pourrait atteindre 3645 t de réduction de déchets.

Afin d'interpréter la différence de réduction de déchets sur les trois scénarios, ces scénarios ont été évalués séparément. Comme la fin de vie du béton est incertaine, une analyse de sensibilité a été menée en considérant 100% de mise en décharge puis 100% de recyclage.

En conclusion, les résultats ci-dessus montrent que les variantes améliorées permettent de diminuer les déchets de manière importante. L'efficacité des différentes variantes améliorées en termes de réduction de déchets est la suivante: 3 scénarios ensemble avec le recyclage du béton > 3 scénarios sans le recyclage du béton > le scénario 1 sans le recyclage du béton > le scénario 2 sans le recyclage du béton > le scénario 3 sans le recyclage du béton.

3.3. Evaluation du scénario 1

Pour évaluer la performance du scénario 1 sur l'économie de déchets et le transfert éventuel vers d'autres impacts, il s'agit de comparer les performances de la variante standard, du Bâtiment FCMB, et de la variante améliorée par le scénario 1 avec et sans le recyclage du béton. Pour rappel, le scénario 1 correspond au remplacement de la structure béton par une structure en acier (poteaux, plancher sec, bardage).



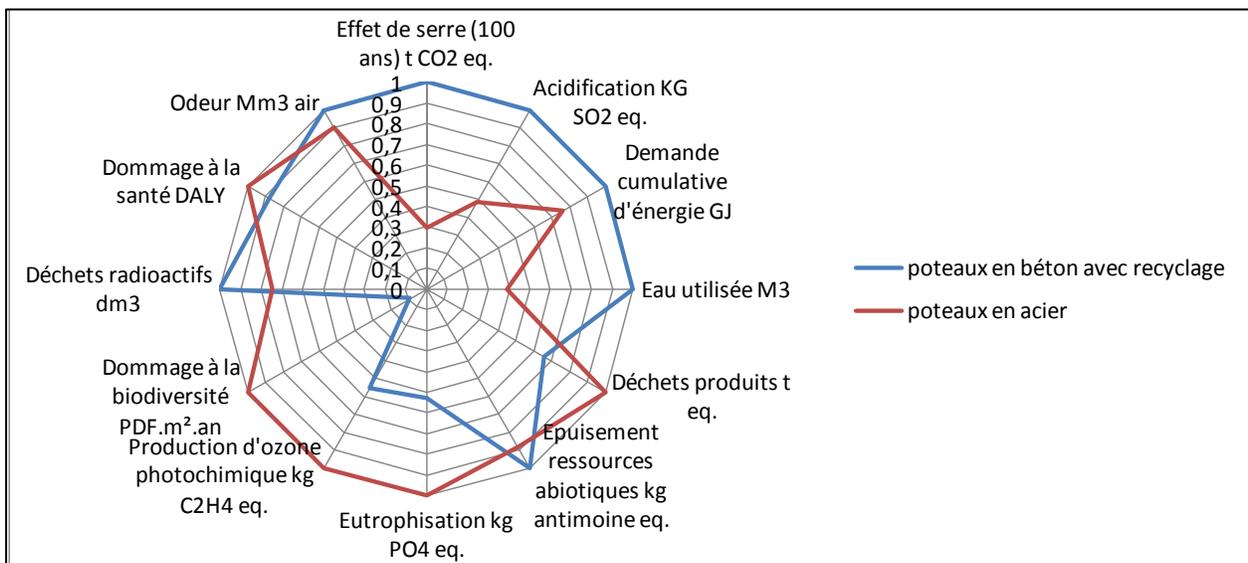
Evaluation du scénario 1 par ACV

Le scénario 1 permet d'avoir un impact plus faible pour tous les indicateurs sauf pour le domage à la biodiversité, ce qui est lié à la production d'acier. Par rapport à la variante standard, 63% de déchets sont évités dans le scénario 1 avec le recyclage du béton dont 20 % lié au recyclage du béton.

Puisque trois changements de la structure (poteaux, plancher sec, bardage) ont été proposés, il est utile d'étudier les trois éléments plus précisément.

Lot poteaux:

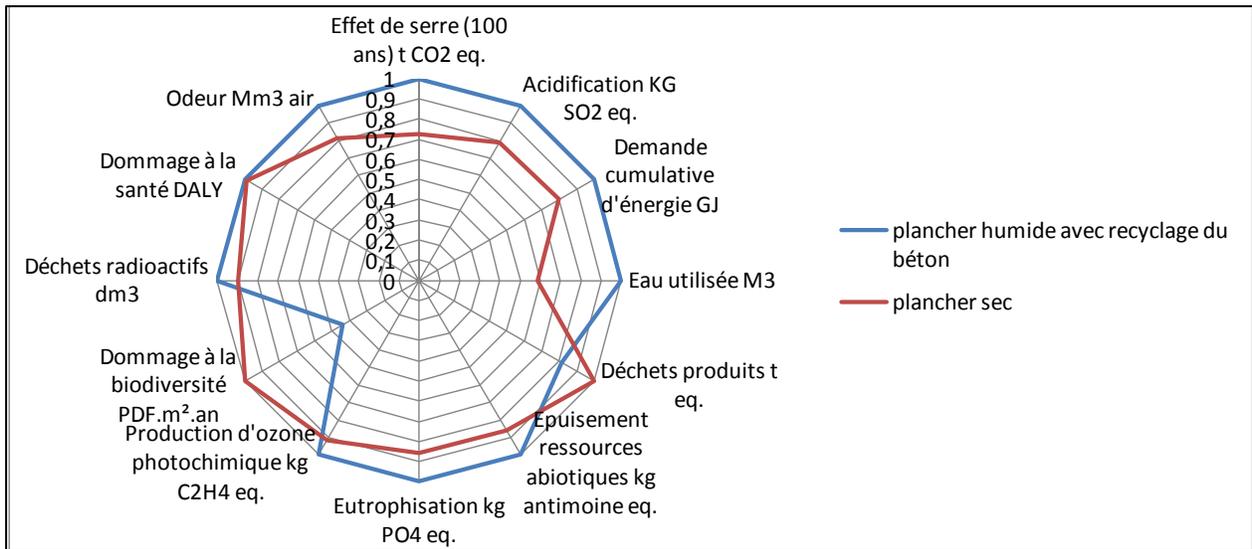
Il convient de comparer l'influence du lot poteaux dans la variante améliorée (béton recyclé en fin de vie) et le scénario 1 (acier).



Evaluation de la contribution du lot poteaux

Le poids des poteaux en béton est supérieur à celui des poteaux en acier mais l'acier produit des impacts environnementaux plus importants par kg que le béton, en ce qui concerne les 'déchets produits' et le 'dommage à la biodiversité'. Sur le cycle de vie total du bâtiment, on constate que les poteaux en acier génèrent plus de déchets que ceux en béton. D'autre part, le transfert d'impact vers d'autres aspects environnementaux (dommage à la biodiversité, eutrophisation, etc.) est assez important.

Lot planchers intermédiaires:

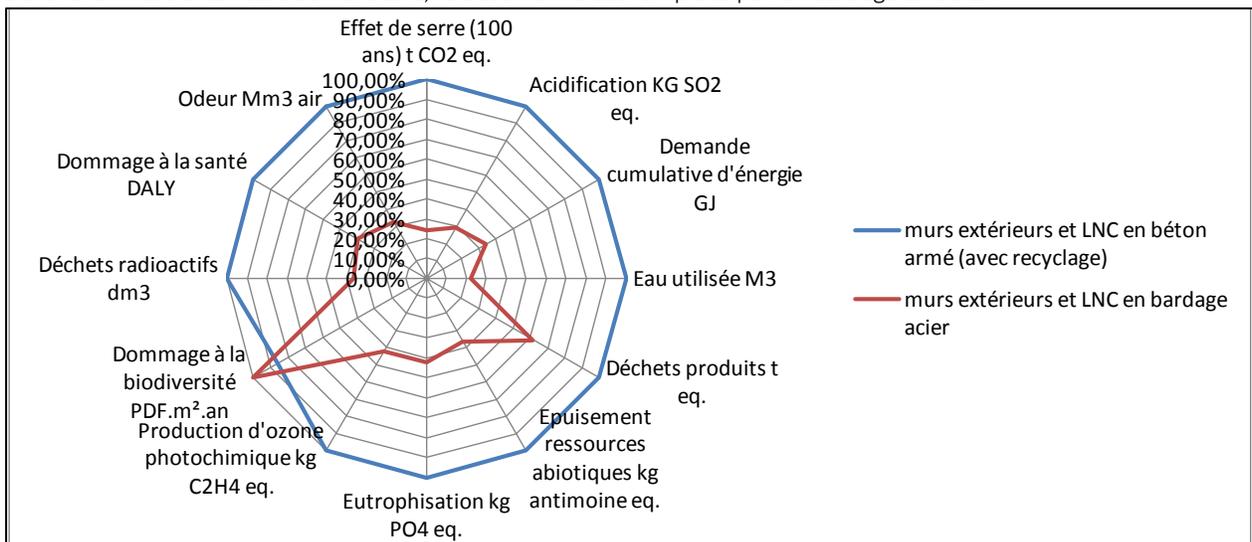


Evaluation de la contribution du lot planchers intermédiaires

La Figure ci-dessus montre que le plancher sec génère plus de déchets que le plancher humide quand on suppose que le béton est totalement recyclé. D'autre part, un transfert d'impact vers le 'dommage à la biodiversité' est constaté.

Lot murs extérieurs+ murs LNC:

Dans le lot murs extérieurs et murs LNC, le béton armé est remplacé par un bardage en acier.



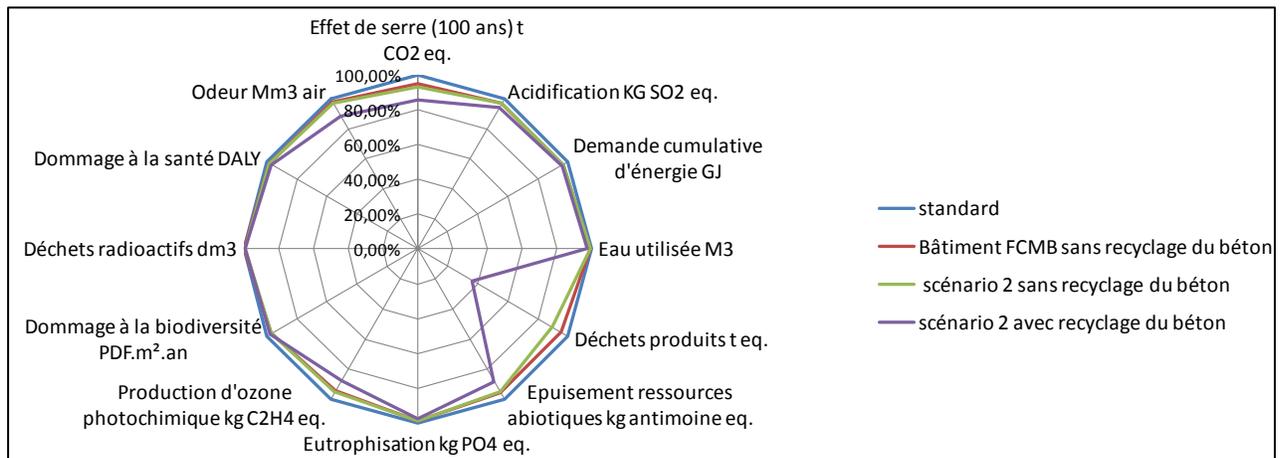
Evaluation de la contribution du lot murs (murs extérieurs et murs LNC)

La Figure ci-dessus montre que le béton armé génère des impacts beaucoup plus importants que le bardage en acier (sauf l'indicateur 'dommage à la biodiversité'). Dans la globalité du scénario 1, cela élimine l'effet négatif des poteaux en acier et des planchers secs pour la réduction des déchets produits, et conduit à une économie de déchets produits pour l'ensemble du scénario 1.

En **conclusion**, avec un avantage en termes d'adaptabilité (multifonction) et de démontabilité des éléments qu'il comporte, le scénario 1 permet de diminuer les déchets produits (40%), mais les poteaux en acier et les planchers secs sont défavorables pour l'économie de déchets produits par rapport au béton avec recyclage. Par ailleurs, le remplacement du béton par l'acier engendre un transfert d'impact vers l'indicateur 'dommage à la biodiversité' avec cependant un écart très faible.

3.4. Evaluation du scénario 2

Pour évaluer la performance du scénario 2 sur l'économie de déchets et les autres impacts, il s'agit de comparer la variante standard, le Bâtiment FCMB, et la variante améliorée par le scénario 2 avec et sans le recyclage du béton (Figure ci-dessous). Pour rappel, le scénario 2 correspond à une simplification de la toiture.



Evaluation du scénario 2 par ACV

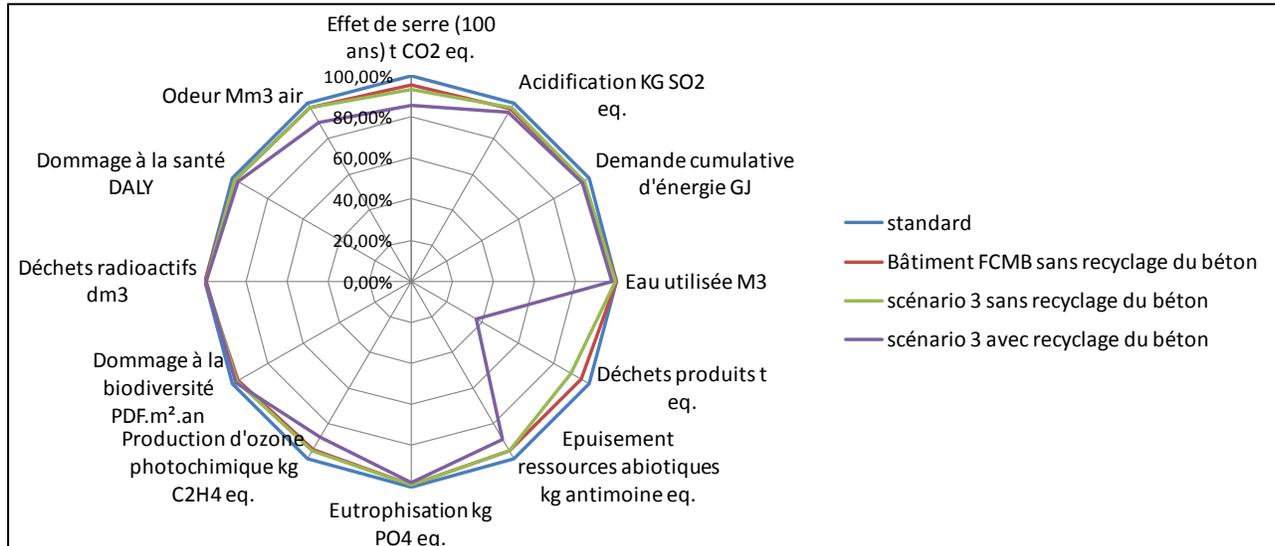
Le scénario 2 génère des déchets moins importants que les variantes standard et Bâtiment FCMB. On note un écart de 10% entre le scénario 2 sans le recyclage du béton et la variante standard, et un écart de 64% entre le scénario 2 avec le recyclage du béton et la variante standard. Ainsi le recyclage du béton contribue à l'économie de déchets (au sens de l'ACV) par une réduction de 54%.

Sur les autres indicateurs environnementaux, le scénario 2 donne des valeurs moins importantes que la variante standard (ou le Bâtiment FCMB). Il n'y a donc aucun transfert d'impact.

Conclusion: La simplification de la toiture nous permet de diminuer les déchets produits par rapport aux variantes initiales (standard et Bâtiment FCMB), en évitant le transfert d'impact vers d'autres aspects environnementaux.

3.5. Evaluation du scénario 3

Pour rappel, le scénario 3 correspond à des cloisons mobiles au lieu, dans les variantes standard ou Bâtiment FCMB, de cloisons sèches qui auraient dû être démolies et reconstruites en cas d'adaptation des locaux. Il s'agit de comparer la variante standard, le Bâtiment FCMB, et la variante améliorée par le scénario 3 avec et sans le recyclage du béton, afin d'évaluer le scénario 3 sur la réduction de déchets.



Evaluation du scénario 3 par ACV

Au total, les déchets produits dans le scénario 3 avec le recyclage du béton sont beaucoup moins importants que ceux dans la variante standard, avec une réduction de 63%, dont 53% grâce au recyclage du béton. Par ailleurs, aucun transfert vers les autres impacts n'est observé.

Conclusion: Grâce à l'adaptabilité des cloisons mobiles, les déchets produits sont moins importants, et sans transfert d'impact. L'écart entre les deux variantes est surtout lié au recyclage du béton.

3.6. Conclusion générale

L'ACV et les comparaisons réalisées dans le cadre du projet BAZED ont permis d'évaluer différents scénarios pour l'économie des déchets en s'assurant du non transfert d'impacts vers d'autres phases ou d'autres impacts. Le Tableau ci-dessous synthétise ces résultats (en valeurs relatives par rapport à la variante standard), en incluant les remarques faites concernant les propositions (transferts d'impact) afin de concevoir un bâtiment à 'zéro déchet'. En termes de réduction de déchets (au sens de l'ACV), il est intéressant de comparer l'apport des différents scénarios à celui du recyclage du béton (qui conduit à une réduction de 56% des déchets à éliminer).

Proposition	Réduction des déchets produits au sens de l'ACV	Transfert d'impacts	Apport du scénario comparativement au recyclage du béton
Scénario 1 (structure acier) sans le recyclage du béton	Oui, très importante (43%)	Oui, vers 'dommage à la biodiversité' (lié à la production d'acier), mais très peu (3%)	du même ordre
Scénario 1 (structure acier) avec le recyclage du béton	Oui, très importante (63%)	Oui, vers 'dommage à la biodiversité' (lié à la production d'acier), mais très peu (3%)	
Scénario 2 (toiture) sans le recyclage du béton	Oui, mais relativement faible (10%)	Non	Faible
Scénario 2 (toiture) avec le recyclage du béton	Oui, très importante (64%)	Non	
Scénario 3 (cloisons) sans le recyclage du béton	Oui, mais relativement faible (10%)	Non	Faible
Scénario 3 (cloisons) avec le recyclage du béton	Oui, très importante (63%)	Non	

Tableau récapitulatif des propositions

Au vu de ces résultats, parmi les différentes actions proposées pour réduire la quantité de déchets, le remplacement de la structure béton par une structure acier est le plus efficace. Une piste de recherche pourrait concerner la réutilisation ou le recyclage à fonction identique ou à valeur maximale, ce qui permet de maximiser les impacts évités. Par exemple, il vaut mieux réemployer ou réutiliser des plaques de béton que les recycler en agrégats. Mais trouver des débouchés pour ces produits n'est pas toujours simple : l'organisation de banques de matières premières secondaires, par exemple sur internet, pourrait être étudiée.

Pour évaluer la contribution des différents scénarios à la prévention des déchets au sens du code de l'environnement, il faudrait évaluer la quantité de déchets générée par le projet en utilisant l'analyse des flux de masse (MFA, "mass flow analysis"). Mais cette approche pose plusieurs questions :

- si l'indicateur est une quantité totale de déchets générés, une tonne d'acier par exemple est-elle équivalente à une tonne de béton en fin de vie, sachant que l'acier sera recyclé, et que les processus de traitement induisent des impacts environnementaux très différents ; l'indicateur de quantité de déchet n'est alors pas pertinent ;
- le processus de recyclage génère lui aussi des déchets, ce qui induit un risque de double comptage.

L'approche MFA ne semble donc pas appropriée pour constituer une mesure pertinente des impacts environnementaux. C'est d'ailleurs plutôt l'approche ACV qui est utilisée dans les normes internationales et les procédures de certification. L'ACV est également employée par les centres de recherche pour progresser dans la connaissance des impacts environnementaux et des moyens de les réduire, en particulier dans le secteur de la construction.

Il ne faut toutefois pas demander à l'ACV de répondre à l'ensemble des questions. L'ACV ne peut en effet généralement pas calculer seule la réduction d'une quantité de déchets liée à une action de prévention. Par exemple une surface de bardage donnée sera la même calepinée ou non. Charge à l'opérateur d'entrer comme input au programme que le taux de surplus de matière pour cette surface donnée n'est plus, sur la base d'estimations préalables, de 10 % mais de 3%. L'ACV ne peut pas définir par calcul ce taux de réduction. L'ACV fournira en

revanche des données sur les quantités globales de déchets liées à l'ensemble du cycle de vie et en lien aux autres impacts.

De plus la réduction des déchets en phase de chantier dépend des comportements (soin dans le maniement et la découpe des éléments de construction, organisation du chantier) et pas seulement de la description physique du projet et des choix des concepteurs.

La prévention des déchets au sens du code de l'environnement peut alors donner lieu à une sensibilisation des acteurs, et cette approche pourra être intégrée dans le guide prévu en phase 3. Dans l'étude présentée dans ce livrable, le scénario 1, dans lequel la structure béton est remplacée par une structure et un bardage acier plus légers, permet de réduire la quantité de déchets plus fortement que les deux autres scénarios, ce qui se retrouve dans le tableau ci-dessus avec une contribution plus importante par rapport au recyclage du béton.

Annexe 1 : Présentation des outils logiciels utilisés

Outil de simulation thermique dynamique Pleïades+Comfie et modelleur graphique Alcyone

Introduction

A la fin des années 80, deux types d'outils existaient pour étudier la performance thermique des bâtiments : les méthodes simplifiées (bilans mensuels comme celui de la réglementation thermique 1988), et les outils détaillés (TRNSYS, DOE2, ESP...) très peu utilisés par les professionnels car trop coûteux en temps de saisie et d'apprentissage. C'est dans ce contexte qu'a été développé COMFIE, grâce aux techniques de réduction de modèle développées au Centre d'Énergétique (Bacot, 1984), (Peuportier, 1988), (Blanc Sommereux, 1989).

L'objectif est d'étudier la pertinence des approches « bioclimatiques », en particulier de concepts comme l'isolation transparente et les vérandas, à la fois en terme d'économie d'énergie et de confort. En effet certaines réalisations solaires des années 70 avaient constitué des contre références à cause de fortes surchauffes d'été. Il est donc nécessaire d'étudier à la fois les besoins de chauffage et les évolutions de température, ce que ne permettent pas les méthodes simplifiées. D'autre part, la simulation permet de calculer de manière plus précise les apports solaires utiles en fonction de l'inertie du bâtiment, et de prendre en compte les échanges entre zones.

L'approche a pu paraître décalée dans un contexte d'énergie bon marché. Elle a néanmoins intéressé quelques concepteurs pionniers, et une première interface utilisateurs conviviale a été développée sur Macintosh.

L'idée de prendre en compte les aspects environnementaux dans la conception des bâtiments a fait son chemin, avec la médiatisation apportée par l'association HQE. Même si cette association ne fait pas la promotion de la simulation thermique, les exigences en matière de confort conduisent un nombre croissant de concepteurs à utiliser cette méthode. Le développement de l'interface PLEIADES a facilité l'usage et donc la diffusion de COMFIE parmi les professionnels.

Principes de la modélisation

Dans l'analyse thermique d'un bâtiment, un outil en dynamique est nécessaire pour modéliser le stockage de chaleur et évaluer les gains solaires utiles. Dans cette famille d'outils, les modèles aux différences finies sont les plus généraux car ils peuvent prendre en compte des phénomènes très variés. Développés sur micro-ordinateurs, les outils de ce type à usage professionnel étaient dans les années 80 limités au cas monozone (une température d'air unique dans tout le bâtiment). On peut citer par exemple CASAMO (Watremez, 1985).

Grâce aux techniques de réduction de modèles, il a été possible de décrire plus finement un bâtiment, en considérant plusieurs zones thermiques. Nous présentons ici une simulation simplifiée, dans laquelle un modèle aux différences finies a été réduit par analyse modale. Cette méthode a été initialement développée pour la mécanique avant d'avoir été appliquée à la thermique (Carter, 1979). La théorie a été complétée (Bacot, 1984) pour donner lieu à diverses applications en thermique du bâtiment (Neveu, Lefebvre, Salgon, Sicard, 1987).

Les principaux phénomènes liés à l'évolution thermique des bâtiments peuvent être représentés ou approximatés par des équations linéaires. Lorsqu'on peut isoler un tel système linéaire, il est possible d'appliquer l'analyse modale. On obtient alors une modélisation simplifiée des phénomènes linéaires. Cette simplification est un peu coûteuse en temps calcul car il faut diagonaliser une matrice et effectuer un changement de base. Si le système linéaire ne varie pas ou si la période de simulation peut être découpée en un nombre restreint d'intervalles sur lesquels le système est invariable, l'investissement en temps est rentabilisé car la réduction du modèle accélère la simulation.

Mais il existe aussi des phénomènes représentés par des équations non linéaires (par exemple la convection naturelle), et d'autre part le système linéaire peut être variable (la fermeture d'un volet augmente la résistance thermique d'une fenêtre). Nous avons donc séparé ces équations du système linéaire fixe, et nous les avons couplées en phase de simulation au modèle modal réduit. Pour assurer l'homogénéité de la modélisation, les phénomènes non linéaires ont été pris en compte par des équations simplifiées.

Principales hypothèses et limites du modèle

Le modèle repose sur le concept de "zone thermique", sous-ensemble du bâtiment considéré à température homogène. Si dans le cas général, cette description est une bonne approximation de la réalité, le modèle ne convient

plus pour des pièces de grande hauteur dans lesquelles l'air est stratifié (exemple des atriums). Dans le futur, il sera peut-être possible de diviser ces pièces en plusieurs zones (par exemple rez-de-chaussée et mezzanine) et de considérer un échange d'air interzones calculé de manière simplifiée, mais cela n'est pas réalisé pour le moment.

Les équations de mécanique des fluides ne sont pas intégrées dans notre démarche de simulation simplifiée. Les échanges d'air sont donc approximés par des corrélations (Blay, 1986). Les infiltrations d'air ne sont pas calculées, car il faudrait connaître la distribution des vitesses et directions du vent sur le site même du bâtiment une fois construit, ce qui pose problème. Des indications sont données pour évaluer les échanges d'air en fonction de la configuration.

Les transferts convectifs et radiatifs au niveau des surfaces des parois sont combinés dans un coefficient d'échange "h" unique. La conséquence est que la température de zone n'est pas une température d'air, mais se rapproche de la température résultante, pondération de la température d'air et des températures des parois. Cette température est un bon indicateur du confort thermique, et nous supposons que l'occupant règle le thermostat pour obtenir une température résultante confortable : il peut compenser un effet de paroi froide en augmentant un peu la consigne. C'est donc la température résultante qui est régulée et non la température d'air.

Le rayonnement solaire entrant dans une zone par les vitrages est réparti sur les différentes parois opaques au prorata des surfaces, après avoir déduit, en fonction des facteurs d'absorption, la fraction redirigée vers l'extérieur. On considère donc ce rayonnement comme diffus, sans suivre la "tâche solaire". Il est difficile de savoir comment les espaces seront meublés, et en pratique le rayonnement direct est réfléchi par les meubles. La répartition du flux, considéré comme diffus, est donc sans doute une hypothèse assez réaliste.

Comme on l'a vu au paragraphe précédent, les phénomènes non linéaires ou à paramètres variables sont découplés du système linéaire fixe. Cela peut introduire des écarts sur les dynamiques rapides. En fait, l'outil est utilisé en pratique avec un pas de temps d'une heure lorsqu'on évalue des besoins de chauffage/climatisation, et d'un quart d'heure à un dixième d'heure lorsqu'on souhaite obtenir des profils de température plus précis (étude de l'intermittence ou du confort d'été). L'analyse n'est donc pas poussée jusqu'aux intervalles de temps très fins, des modèles plus détaillés seraient nécessaires.

Les mécanismes de changement de phase ne sont pas pris en compte dans le modèle actuel, en ce qui concerne l'humidité ou le stockage par chaleur latente. La prise en compte de l'humidité pourrait se faire par des bilans enthalpiques pour chaque zone, d'une manière analogue à la prise en compte actuelle des échanges d'air. L'intégration de matériaux à changement de phase serait plus problématique, car leur couplage thermique avec le reste de l'enveloppe ne concerne pas que la température de zone. En effet, ils peuvent être intégrés dans une paroi. Des sorties supplémentaires sont alors nécessaires pour déterminer les températures d'interface (ce qui ne pose pas de problème, comme l'a montré une autre étude concernant des murs solaires).

Il ne semble donc pas que l'étape de réduction modale soit un frein pour la prise en compte des phénomènes complexes décrits ci-dessus, problèmes communs à tous les outils de simulation. Les avantages des modèles réduits en terme de réduction du temps de calcul permettent de décrire plus finement le bâtiment (nombre de zones) et/ou d'effectuer des études de sensibilité plus complètes.

Algorithme de résolution

La constitution d'un modèle aux différences finies est assez classique (Neveu, 1984), elle est menée ici pour chaque zone. Les parois sont décomposées, en monodimensionnel, en mailles sur lesquelles un bilan thermique est écrit en supposant la température uniforme. Pour que cette hypothèse d'uniformité ne s'écarte pas trop de la réalité, il faudrait en théorie découper en mailles très fines. Or l'objectif est de réduire le temps de calcul pour s'adapter à la pratique professionnelle, ce qui impose des limites sur la taille du modèle. Le compromis choisi consiste à placer le petit nombre de mailles auquel on est limité de telle sorte que l'uniformité de la température soit maximale.

La première idée est de ne pas regrouper dans une maille des couches de matériaux séparées par un isolant. Ensuite, le nombre de mailles doit être plus important dans les murs massifs que dans les cloisons légères. Enfin, on s'intéresse aux températures dans les différentes zones du bâtiment, et celles-ci sont plus influencées par les faces internes des parois, elles-mêmes influencées par les variations de puissance de chauffe (équipement régulé, intermittence,...), que par les faces externes. La possibilité a alors été donnée, de définir des mailles plus fines à la surface interne de la paroi. Une raison géométrique r relie l'épaisseur des mailles successives: si e est l'épaisseur de

la maille la plus interne, sa voisine a pour épaisseur $r.e$, la suivante $r^2.e$, etc... La valeur de r peut être modifiée, comme celle du nombre n de mailles placées dans les murs massifs.

Etant définies en fonction de n et r , les mailles ne correspondent en général pas à des couches de matériaux. Les propriétés physiques des différents matériaux constituant une maille sont alors combinées: les inerties et les résistances thermiques sont additionnées.

On dispose donc d'un maillage paramétrable (en fonction de n et de r), ce qui permet de construire des modèles plus ou moins fins. Ce maillage peut être qualifié d'automatique: les parois sont "auscultées" pour déterminer le nombre de mailles et leur disposition, donc l'utilisateur n'a pas besoin de définir lui-même ces choix. Diverses valeurs de n et r ont été comparées (Peuportier et Blanc Sommereux, 1988). Pour divers types de murs, il apparaît que trois mailles sont suffisantes pour obtenir des résultats quasiment identiques (au dixième de degré près) à une référence correspondant à 20 mailles. La valeur de r est peu influente, une valeur de trois a également été choisie.

Une paroi interne à une zone est divisée en mailles de manière analogue, avec une légère différence dans le cas sans isolant ou si les deux parties séparées par l'isolant sont toutes les deux légères ou toutes les deux massives. Dans ces trois cas, tous les matériaux de la paroi sont regroupés en un matériau unique équivalent, divisé en deux parties symétriques. Le plan central est considéré comme adiabatique. On place alors n noeuds dans l'une des deux moitiés, avec une condition de flux nul au niveau du plan médian. Cela permet d'accroître la précision pour un nombre de mailles donné.

Il n'y a jamais de maille dans les isolants, car leur capacité thermique est considérée comme négligeable par rapport à celle des autres matériaux. Un isolant est donc modélisé simplement par une résistance thermique, son inertie thermique est ajoutée à celle de la ou des mailles voisines.

On ne place pas non plus de maille dans un vitrage: la surface des vitres est grande comparée à leur volume, et on suppose que le régime permanent est atteint rapidement dans ces composants. La résistance thermique variable liée à l'usage des occultations (stores, volets,...) est prise en compte au niveau de la simulation, en introduisant une puissance de chauffe équivalente à la diminution des déperditions. L'air, le mobilier et les cloisons légères éventuelles contenues dans la zone sont regroupés dans une maille unique. En effet, on suppose que le volume des meubles est petit par rapport à leur surface d'échange, et qu'ils sont quasiment à la température de la zone.

Durant le maillage, les sollicitations sont répertoriées pour permettre leur calcul horaire ultérieur à partir des rayonnements global horizontal et diffus. Le climat est représenté par des années types, par exemple des "Test Reference Year"(Lund, 1985).

Chaque modèle de zone est ensuite réduit par analyse modale. Les études de validation ont montré, par comparaison avec un modèle non réduit, que six modes suffisent pour rendre compte du comportement dynamique des zones. Le premier mode, associé à la plus grande constante de temps, représente l'évolution globale vers le régime permanent. Les autres sont représentatifs de dynamiques plus rapides liées à des composants (murs, planchers...) et à des sollicitations, par exemple des variations quotidiennes d'ensoleillement, une puissance de chauffe régulée, etc.

Les modèles réduits sont alors couplés (Blanc Sommereux et Lefebvre, 1989). Il s'agit de rassembler les sous-systèmes matriciels de chaque zone en un modèle global de bâtiment. Les sollicitations externes sont séparées des températures d'interface, qui constituent les variables de couplage. Le système global est ensuite intégré selon le pas de temps choisi par l'utilisateur (en pratique de 6 minutes à une heure), et les variables de couplage sont éliminées.

Les phénomènes non linéaires et/ou variables sont couplés à ce modèle modal global grâce aux sollicitations de puissances injectées dans les différentes zones. Les échanges par ventilation par exemple sont donc ajoutés à la puissance de chauffage et aux apports internes de manière à constituer une sollicitation unique pour chaque zone.

Implémentation informatique

Le logiciel est écrit en langage pascal, dans l'environnement Delphi. Un bâtiment est décrit sous la forme d'une structure d'objets reliés par des pointeurs (Peuportier et Blanc Sommereux, 1988). Les composants de base, matériaux, vitrages, revêtements de murs etc. sont combinés pour former des structures plus complexes: parois, zones, bâtiment entier. Le comportement des occupants, lié à l'utilisation du bâtiment (habitations, bureaux,...), est défini dans un scénario d'occupation, contenant les profils de températures de consigne, de ventilation et d'apports internes pour chaque jour de la semaine.

Chaque objet est relié aux autres par un pointeur: une zone thermique contient des pointeurs sur ses parois, chaque paroi contenant elle-même des pointeurs sur des vitrages, des masques, etc. La description d'un projet peut être plus ou moins complexe: une grande façade par exemple peut être découpée en plusieurs parois de zone pour évaluer plus précisément l'effet d'un masque. L'intérêt d'une telle structure est de faciliter la modification, l'addition, la suppression ou le remplacement d'un objet à n'importe quel niveau. La programmation orientée objets a permis d'ajouter des composants, par exemple : calcul d'éclairage, murs solaires, systèmes photovoltaïques et solaires thermiques.

L'interface PLEIADES 2004

L'environnement PLEIADES a été conçu et développé par Gefosat puis IZUBA énergie avec le soutien de l'ADEME. PLEIADES + COMFIE ont notamment été utilisés dans le cadre du programme européen SOLMI (THERMIE) et de l'action ALTENER "Développement de la simulation des ambiances pour l'architecture solaire bioclimatique" (AL/192/96/FR).

PLEIADES + COMFIE intègre plusieurs bibliothèques de données thermiques sur les matériaux et les éléments constructifs, les menuiseries, les états de surface, les albédos et les écrans végétaux. Le logiciel comprend aussi des bibliothèques de modes de gestion du bâtiment étudié selon un scénario horaire pour une semaine-type (occupation, apports internes, températures de consigne de chauffage ou de climatisation, gestion des occultations). Chaque ouverture vitrée peut être affectée d'un masque intégré à la construction (auvent, brise-soleil etc.). Les masques lointains (relief, autres bâtiments), les obstacles à l'ensoleillement à proximité de chaque paroi (arbre, masques architecturaux) sont également pris en compte (cf. Fig. 1).

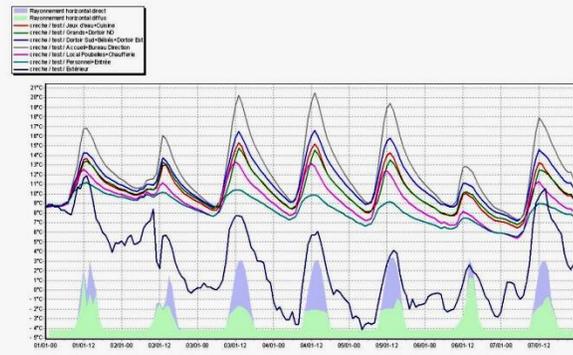
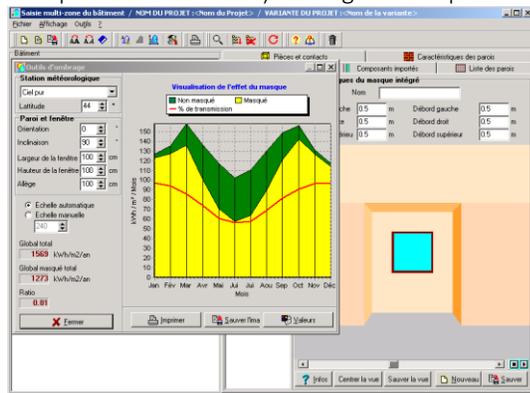


Figure 1 : analyse de l'influence d'un masque constructif

Figure 2 : courbes comparatives entre variantes

Les ventilations extérieures sont définies pour chaque zone par un scénario hebdomadaire et horaire. Il est également possible de prendre en compte différents types de ventilation interne entre les pièces : ouverture de porte avec indication de la fréquence d'ouverture ou d'une régulation, orifices de ventilation, ventilation mécanique inter zones, mur Trombe.

Les zones peuvent être à évolution libre (température flottante), ou bien thermostatées (avec une consigne de chauffage et une consigne de climatisation hebdomadaire et horaire). Dans ce dernier cas les puissances de chauffe et de rafraîchissement nécessaires pour maintenir la température souhaitée sont calculées à chaque pas de la simulation. Pour chaque zone, il est aussi possible de définir la puissance de l'équipement de chauffage et de refroidissement, l'efficacité de l'échangeur récupérateur (en ventilation double flux) et la position du thermostat (qui peut être dans une autre zone).

Un éditeur de graphes facilement paramétrable permet l'analyse graphique des résultats et la comparaison des variantes (cf. Figure 2). Une série d'indices est générée automatiquement après la simulation pour apprécier rapidement les performances du bâtiment. Ils permettent de mieux appréhender sur la période analysée les *surchauffes* (calcul de la moyenne de dépassement de température durant la période de surchauffe la plus importante), *l'amplification* (moyenne des pourcentages journaliers d'amplification de la température extérieure), *le taux d'inconfort* (pourcentage de temps durant lequel la température a été supérieure ou inférieure à certaines valeurs), *les besoins énergétiques* (somme des besoins nets de chauffage et de rafraîchissement) et le *pourcentage*

Bibliographie

- Patrick Bacot , Analyse modale des systèmes thermiques, Doctorate Thesis, University Paris VI, 1984
- Patrick Bacot, Alain Neveu, Jean Sicard, Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment, Revue Générale de Thermique, n°267, Paris, 1984
- Isabelle Blanc Sommereux, Gilles Lefebvre, Simulation de bâtiment multizone par couplage de modèles modaux réduits, CVC, n°5, mai 1989
- Isabelle Blanc Sommereux, Bruno Peuportier, a bioclimatic design aid based on multizone simulation, ISES Conference, Denver, 1991
- Dominique Blay, Comportement et performance thermique d'un habitat bioclimatique à serre accolée, Bâtiment-Energie n°45, 1986
- C. Carter, A validation of the modal expansion method of modelling heat conduction in passive solar buildings, Solar Energy 23 n°6, 1979
- Gilles Lefebvre, Analyse et réduction modale d'un modèle de comportement thermique de bâtiment, Doctorate Thesis, University Paris VI, 1988
- H. Lund, Short Reference Years and Test Reference Years for EEC countries, EEC Contract ESF-029-DK, 1985
- Alain Neveu, Etude d'un code de calcul d'évolution thermique d'une enveloppe de bâtiment, Doctorate Thesis, University Paris VI, 1984
- Bruno Peuportier, Validation of COMFIE, Rapport C.E.C., Université de Stuttgart (I.T.W.), 1989
- Bruno Peuportier, Isabelle Blanc Sommereux, Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings, International Journal of Solar Energy, 1988
- J.J. Salgon et A. Neveu, Application of modal analysis to modelisation of thermal bridges in buildings, Energy and buildings, october 1987
- Gabriel Watremez, Dominique Campana, François Neirac, Elaboration d'un logiciel sur micro ordinateur pour l'aide à la conception des bâtiments en pays tropicaux secs, rapport final REXCOOP, 1985

Analyse de cycle de vie des bâtiments : outil novaEQUER

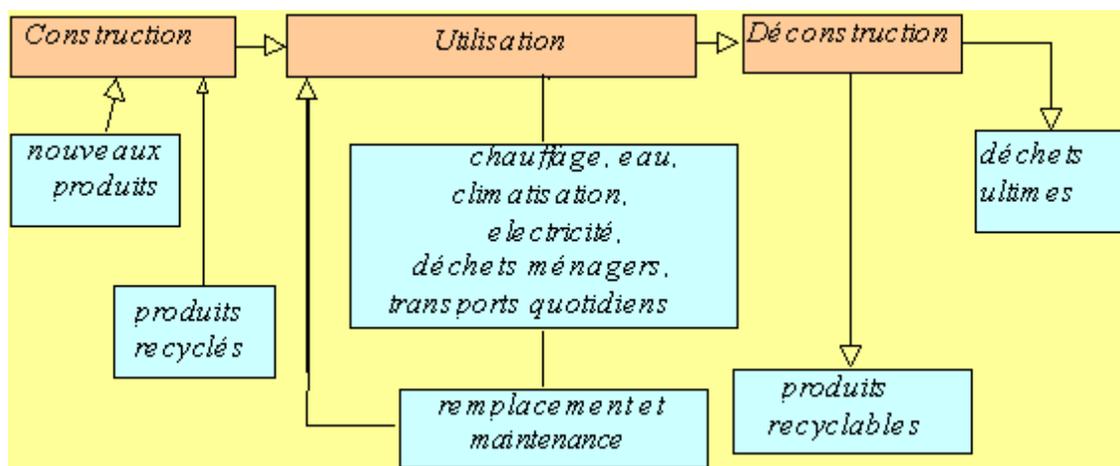
novaEQUER est un outil d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments, ayant pour but d'aider les acteurs à mieux cerner les conséquences de leurs choix. Un tel outil d'analyse est utilisable par l'ensemble des professionnels du bâtiment. Un Architecte peut mieux justifier son projet auprès du Maître d'Ouvrage, en présentant un bilan environnemental rigoureux de son projet. L'élargissement des missions des BET permet une valorisation de leur statut dans l'équipe de construction. Les industriels peuvent promouvoir de nouveaux produits, car un bilan global énergie-environnement constitue une évaluation pertinente d'un composant. La méthode peut également être utilisée pour constituer une base de connaissances sur la construction à faible impact environnemental, et pour mieux informer les occupants.

L'approche par analyse de cycle de vie (ACV) est adoptée le plus souvent au niveau international pour répondre au problème de l'évaluation des impacts environnementaux. Il s'agit d'étudier un produit, depuis sa fabrication, en prenant en compte ses composants et donc en remontant aux ressources puisées dans l'environnement, jusqu'à sa fin de vie, y compris le traitement des déchets ultimes créés, en passant par toutes les étapes de son utilisation. Cette méthode a été appliquée au produit "bâtiment", en tenant compte de ses spécificités par rapport aux produits industriels : chaque bâtiment est en général unique, et entretient des liens forts tant avec le site dans lequel il est intégré qu'avec ses occupants.

Le principe général est d'améliorer la qualité de l'ambiance intérieure tout en réduisant les coûts environnementaux externes. Un objectif fonctionnel étant fixé - le bâtiment doit permettre un certain nombre d'activités pour lesquelles il est prévu, avec un certain niveau de confort, de qualité de la vie, etc.-, il s'agit de minimiser l'impact environnemental en comparant des variantes répondant à ces exigences fonctionnelles.

Un outil informatique facilite les comparaisons de variantes, constituant ainsi une aide à la décision. Les calculs sont basés sur la simulation numérique, pour représenter la réalité de manière plus précise que des outils plus simplifiés. Le chaînage avec un outil de simulation thermique établit le lien entre l'analyse énergétique et l'analyse environnementale. Ainsi, l'énergie n'est plus perçue comme une simple quantité de kWh, mais appréhendée selon une série de critères : l'épuisement des ressources naturelles, l'effet de serre, le smog, l'acidification, les déchets radioactifs, etc. D'autre part, l'énergie ne concerne pas que le chauffage ou l'éclairage : l'énergie récupérée dans un incinérateur couplé à un réseau de chaleur est prise en compte, ainsi que l'énergie nécessaire à la fabrication des matériaux de construction, au transport généré par le bâtiment ou à l'alimentation en eau potable. Enfin, des aspects non liés à l'énergie (gestion de l'eau, matériaux de construction,...) sont pris en compte.

Principe du calcul de l'inventaire général



Simulation avec un pas de temps annuel

Les besoins de chauffage (éventuellement de climatisation) calculés par le logiciel COMFIE sont automatiquement transmises à novaEQUER, ainsi que toutes les données d'entrées nécessaires aux calculs thermiques. La géométrie de l'enveloppe et sa constitution sont donc déjà saisies par ailleurs. Des variables supplémentaires sont demandées (consommation d'eau, gestion des déchets ménagers (tri du verre, du papier, mise en décharge ou incinération, éventuellement avec récupération d'énergie), distances de transport domicile-travail et domicile-commerces,...).

La base de données Ecoinvent constituée par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich est utilisée pour les inventaires de fabrication des matériaux et d'autres procédés (Frischknecht R., 2007). Les résultats sont présentés sous forme d'éco-profil, avec la possibilité de visualiser la contribution de chaque phase (construction-utilisation-rénovation-démolition) et de comparer jusqu'à 4 variantes d'un projet. Les éco-profil synthétisent les différents thèmes environnementaux abordés : l'épuisement des ressources (énergie primaire, eau, substances rares), l'effet de serre, la toxicité humaine, l'acidification, les déchets (radioactifs ou non), la qualité de l'air (smog et odeurs), la pollution de l'eau (eutrophisation et éco-toxicité), cf. le tableau ci-dessous.

Liste des thèmes environnementaux considérés

Liste des thèmes	unités
Epuisement des ressources	kg Sb eq
Consommation d'énergie primaire	MJ
Consommation d'eau	kg
Acidification	kg SO2 eq.
Eutrophisation	kg PO4 ³⁻ eq.
Réchauffement global (GWP100)	kg CO2 eq.
Déchets non radioactifs	kg
Déchets radioactifs	dm ³
Odeurs	m ³
Ecotoxicité aquatique et terrestre	PDF.m ² .an
Toxicité humaine	DALY
Ozone photochimique (smog)	kg C2H4 eq.

Plusieurs exercices de comparaison interlogicielle ont été menés, en particulier dans le cadre du réseau thématique européen PRESCO (Peuportier, 2004).

Exemple d'application

La démarche d'éco-conception a été mise en oeuvre dans divers projets, en construction neuve et en réhabilitation, dans le secteur résidentiel mais aussi en tertiaire (bureaux, bâtiments scolaires...). Ces applications ont permis de montrer l'importance qui doit être accordée à la phase d'utilisation : dans une maison standard actuelle par exemple, la phase de construction ne représente qu'environ 20% de l'énergie consommée, contre 80% pour l'utilisation (chauffage, eau chaude sanitaire, éclairage et autres usages de l'électricité). Mais pour une maison correspondant aux meilleures pratiques actuelles en termes d'efficacité énergétique (label allemand « maison passive »), la part de la construction peut monter jusqu'à 50%. Par rapport à une maison standard chauffée au gaz, une maison passive chauffée par pompe à chaleur émet 3,5 fois moins de CO₂ mais génère 30% de plus de déchets radioactifs [36]. La production d'électricité par énergie renouvelable (toiture photovoltaïque par exemple) permet de réduire la plupart des impacts par rapport à la référence standard. Cette recherche du meilleur équilibre entre la réduction des consommations et la production locale renouvelable sera sans doute un élément important dans l'éco-conception des futurs bâtiments.

Afin d'illustrer la démarche, une application est présentée ci-dessous concernant les premières maisons « passives » (c'est-à-dire à très basse consommation énergétique), construites en France en 2007 à Formerie (Oise) par l'entreprise Les Airelles Construction. Il s'agit de deux maisons jumelles de surface, d'orientation et de disposition identiques (excepté le garage), comportant deux niveaux (cf. Figure ci-dessous). Chaque maison a une surface

habitable de 132 m².

Vue des maisons étudiées (Architecte.: En Act architecture), photo : Les Airelles Construction



Des stores extérieurs assurent une protection solaire efficace. Les maisons sont équipées d'un puits climatique formé de tubes de 30 m de longueur enterrés à 2 mètres de profondeur, permettant de rafraîchir l'air neuf en été en bénéficiant de la fraîcheur du sol. Un échangeur permet de récupérer à 80% la chaleur de l'air vicié, mais une efficacité globale de 70% a été considérée car l'air entrant par les infiltrations ne transite pas par cet échangeur. Une pompe à chaleur réduit les consommations pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, le coefficient de performance étant de l'ordre de 3. Des capteurs solaires en toiture et un ballon de stockage constituent un système solaire thermique assurant de l'ordre de 50% des besoins énergétiques pour l'eau chaude sanitaire.

Une maison passive mobilise davantage de matériaux qu'une maison standard (isolant plus épais, triple vitrage, chauffe eau solaire etc.). La démarche d'éco-conception a alors été utile pour améliorer la performance environnementale de ce concept, en prenant en compte l'impact supplémentaire de la fabrication des produits mais aussi l'énergie économisée dans la durée. Les études ont porté par exemple sur les surfaces de fenêtre et l'inertie thermique (au niveau des cloisons intérieures et des planchers). Le climat de Trappes a été considéré pour les calculs thermiques. L'usage de la simulation dynamique a conduit à augmenter l'inertie thermique des maisons afin d'améliorer le confort et de mieux stocker les apports solaires en hiver. Des cloisons intérieures lourdes ont alors été intégrées à l'ossature bois prévue pour l'enveloppe extérieure. Les besoins de chauffage du bâtiment sont alors réduits, ce qui permet de satisfaire les critères du label « maison passive ».

Afin de mieux cerner la performance du bâtiment, une comparaison a été effectuée avec un bâtiment de forme identique mais comportant des technologies correspondant aux valeurs de référence de la réglementation thermique (cf. tableau ci-dessous).

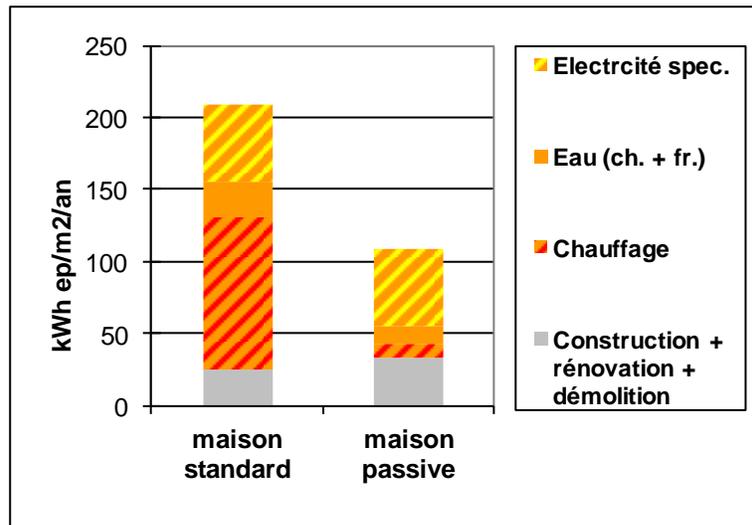
Principales caractéristiques des maisons

Standard règlementaire	Maisons passives
Isolation : 13 cm (murs), 14 cm (plancher) et 22,5 cm (toit)	Isolation : 37 cm (murs), 20 cm (plancher) et 40 cm (toit)
Fenêtres double vitrage basse émissivité	Fenêtres triple vitrage
Renouvellement d'air de 0,6 volume par h (y compris les infiltrations)	Efficacité globale de la récupération de chaleur : 70% (intègre les infiltrations)
Chaudière gaz (rendement 87%)	Pompe à chaleur (COP 3), solaire thermique (fraction solaire de 50%)

Dans le bilan environnemental global, qui inclut l'éclairage et l'électroménager, la phase de construction de la maison passive représente un tiers des consommations d'énergie primaire v (cf. Figure ci-dessous) et des émissions de gaz à effet de serre, une durée de vie de 80 ans étant considérée. Les phases de rénovation et de démolition contribuent

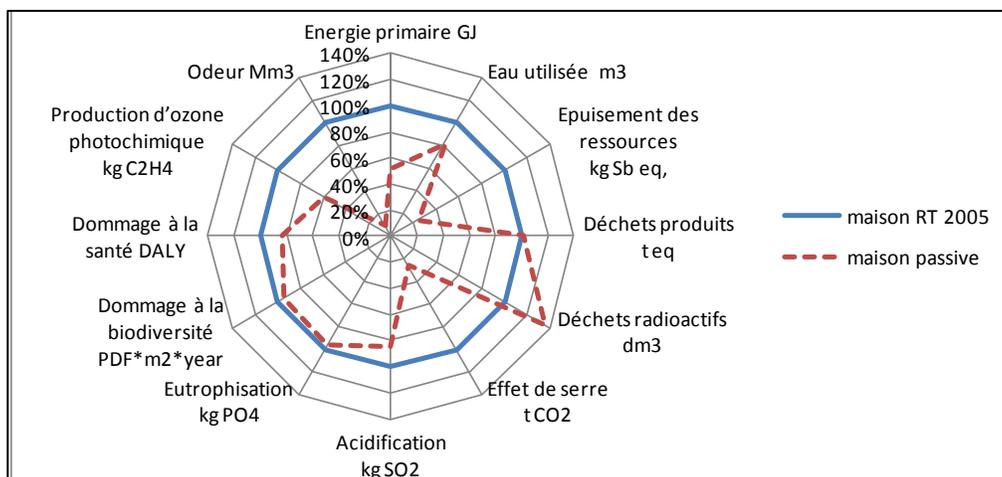
peu à ces impacts. Les matériaux constituent la plus grande part des déchets produits (surtout en phase de démolition), et contribuent de manière importante à la toxicité (années de vie perdues – indicateur DALY-, surtout en phase de fabrication).

Bilan énergétique sur le cycle de vie du bâtiment



La figure ci-dessous montre que, par rapport au standard réglementaire (en référence à 100%, chaque axe du diagramme radar correspondant à un indicateur), la conception passive (valeurs relatives) réduit globalement la plupart des impacts environnementaux : l'augmentation liée à la fabrication des matériaux est largement compensée par les économies d'énergie sur la durée de vie du bâtiment. La pompe à chaleur utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire réduit les émissions de gaz à effet de serre (ceci étant, la demande d'électricité de pointe lors des journées froides d'hiver oblige à recourir à des moyens de production thermiques, fortement générateurs de CO₂), mais génère une quantité plus importante de déchets radioactifs que la chaudière gaz, du fait de la consommation d'électricité. La production d'électricité renouvelable, par exemple avec une toiture photovoltaïque, permettrait d'améliorer le bilan : de nombreuses études par ACV montrent que la quantité d'électricité produite par un module photovoltaïque sur sa durée de vie est très supérieure à l'énergie nécessaire pour sa fabrication.

Comparaison des impacts environnementaux



Des études de sensibilité ont été menées sur la durée de vie des bâtiments (entre 50 et 100 ans), et sur le comportement des habitants. Ces paramètres influencent le bilan environnemental de manière très importante, mais ne remettent pas en question la comparaison ci-dessus.

Conclusions

Il est possible d'appliquer la méthode d'analyse de cycle de vie dans le secteur du bâtiment, sous réserve de bien définir l'unité fonctionnelle considérée et de bien délimiter les frontières du système étudié (bâtiment, site, occupants) en fonction des objectifs de l'étude.

L'analyse de cycle de vie peut permettre d'orienter le développement et d'évaluer l'intérêt de technologies innovantes. Elle constitue également une aide à la décision pour les professionnels concernés, architectes et bureaux d'études techniques, pour améliorer la qualité environnementale des projets, en particulier durant la phase de conception.

Références bibliographiques

Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H-J., Doka G., Dones R., Heck T., Hellweg S., Hischier R., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M., et Wernet G., Overview and Methodology: ecoinvent report No. 1. , www.ecoinvent.ch, Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007

Peuportier B., Eco-conception des bâtiments et des quartiers, Dossier Techniques de l'Ingénieur n°ag6790, avril 2014

Peuportier B. (coordination), Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures, Presses de l'Ecole des Mines, 458p, octobre 2013

Peuportier B., Eco-conception des bâtiments et des quartiers, Presses de l'Ecole des Mines, 336p, novembre 2008

Peuportier B., Kellenberger D., Anink D., Mötzl H., Anderson J., Vares S., Chevalier J., and König H., Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools, Sustainable Building 2004 Conference, Varsovie, octobre 2004

Polster B., Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie, thèse de doctorat, MINES ParisTech, décembre 1995

Annexe 2 : Compléments apportés au modèle thermique

Ajout de réseaux

	Type	Référence ou marque	Diamètre (hypothèse)	Composition
Les réseaux	Réseaux électriques (fils)	Câble U1000 R02V et/ou CRI (trois conducteurs)	Diamètre extérieur: 9,5 mm Longueur: 570 m Masse linéique: 130 kg/km 3 conducteurs de section 1,5 mm ² chacun	Plastique PVC (52,8 kg) Cuivre (21,3 kg)
	Réseaux plomberie en cuivre	Distribution eau froide et eau chaude: tube cuivre	Diamètre extérieur: 10 mm Épaisseur: 1 mm Longueur: 226 m	Cuivre (58,8 kg)
	Réseaux plomberie PVC	Réseau EU- EV: Tube PVC NF M1	Diamètre extérieur : 100 mm Épaisseur: 3 mm Longueur : 50 m	PVC (64,2 kg)

Informations sur les réseaux

Précision sur le calcul des réseaux électriques (fils):

Masse volumique $\rho_{\text{cu}} = 8920 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{pvc}} = 1400 \text{ kg/m}^3$.

Longueur $L = 570 \text{ m}$, masse linéique: $\rho = 130 \text{ kg/km}$, masse totale $M = L \cdot \rho = 74,1 \text{ kg}$.

Masse linéique $m_{\text{cu}} = 1,5 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 8920 = 4,014 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}$,

Masse linéique $m_{\text{pvc}} = [\pi \cdot (9,5/2)^2 - 3 \cdot 1,5] \cdot 10^{-6} \cdot 1400 = 9,92 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}$.

Ainsi masse $m_{\text{cu}} = 74,1 \cdot 4,014 \cdot 10^{-2} / (4,014 \cdot 10^{-2} + 9,92 \cdot 10^{-2}) = 21,3 \text{ kg}$, $m_{\text{pvc}} = 52,8 \text{ kg}$.

Précision sur le calcul des réseaux plomberie en cuivre:

On suppose un tube de cuivre 10 - 1, soit 10 mm de diamètre extérieur pour 1 mm d'épaisseur. La longueur du tube d'eau froide est supposée égale à la distance entre la chaufferie et le poste utilisant l'eau sanitaire. On le multiplie par 1,2, afin de prendre en compte des raccords, des contournements, etc. La longueur du tube d'eau chaude est la même que celle pour l'eau froide.

Précision sur le calcul des réseaux plomberie en PVC (eaux usées) :

On suppose un tube PVC NF M1, sa longueur est la distance verticale entre chaque sanitaire et le sol, et on prend également en compte la canalisation au-dessous des locaux : une valeur de 50 m est considérée.

Ajout de structure porteuse en béton

Type	Nombre	Section	Longueur totale (m)	Masse (tonne)
Poteaux verticaux (niveau atelier)	26	40 * 40 cm	131,3	48,3 t
Poteaux horizontaux (niveau atelier)	/	40* 40 cm	263,7	97 t
Poteaux verticaux (niveau administratif)	38	20 * 20 cm	100,7	9,3 t
Poteaux horizontaux (niveau administratif)	/	20 * 20 cm	265,1	24,4 t

Structure porteuse en béton

Une masse totale de béton lourd de 179 t est considérée (masse volumique de 2300 kg/m³).

Ajout de charpentes en bois

Le volume de charpente ajouté est de 174 m³.

Modification du lot toiture

Niveau ateliers (RDC, R+1) : toiture terrasse béton

Niveau administration / formation (R+1/ R+2) :

Toit végétalisé (toiture terrasse végétalisée + étanchéité + panneau bois)

Toiture terrasse bac acier (bac acier + laine de verre + plâtre) dont les parties inclinées supportent les panneaux photovoltaïques

Modification du plancher intermédiaire

Niveau atelier (RDC, R+1) et planchers suspendus : prédalle béton + parquet pin massif

Niveau administration (R+1/R+2) : plancher bois +parquet massif pin

Annexe 3 : Description détaillée du bâtiment

Caractéristiques du site

Site

Nom	Bayonne_ind	Altitude	10 m
Longitude	0° 36' 36"E	Latitude	44° 1' 12"N

Station météorologique

Nom	Agen - H2c (RT2012) fichier AgenH2cRT2012.try	Altitude	10 m
Longitude	0° 36' 36"E	Latitude	44° 1' 12"N
Températures	Minimale	Maximale	Moyenne
	-2.70°C	37.60°C	13.51°C

Degrés Jours Unifiés base 18°C

An-nuels	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
2090	362	305	211	197	113	40	20	14	85	119	237	387

Compositions de paroi

Béton plein 20cm

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Total					8.75	0.11

Béton plein + Pregymax 32 100+13

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Unimat Pregymax 32	10.0	0.032	25	0.383	0.32	3.13
Plaque de plâtre 13 mm	1.3	0.325	850	0.222	25.00	0.04
Total					0.30	3.28

Cloison BA13 + LDV 45mm + BA13

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Plaque de plâtre 13 mm	1.3	0.325	850	0.222	25.00	0.04
Laine de verre	4.5	0.041	12	0.233	0.91	1.10
Plaque de plâtre 13 mm	1.3	0.325	850	0.222	25.00	0.04
Total					0.85	1.18

Plancher TP isolé UNIMAT SOL 70mm

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Carrelage	1.0	1.700	2300	0.194	170.00	0.00
Mortier	1.0	1.150	2000	0.233	115.00	0.00
Béton lourd	15.0	1.750	2300	0.256	11.67	0.09
Polystyrène expansé	10.0	0.039	25	0.383	0.39	2.56
Total					0.38	2.66

Toiture terrasse bac acier FCMB

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Acier Inox	0.1	16.000	7900	0.142	16000.00	0.00
Laine de verre	20.0	0.041	12	0.233	0.20	4.88
Enduit plâtre	1.0	0.350	1500	0.278	35.00	0.03
Total					0.20	4.91

Toiture terrasse non isolée

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Feutre bitumeux	0.1	0.500	1700	0.278	500.00	0.00
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Total					8.60	0.12

dalle béton + parquet pin massif

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Bois lourd	2.0	0.230	650	0.667	11.50	0.09
Béton lourd	27.0	1.750	2300	0.256	6.48	0.15
Total					4.15	0.24

Bois 1 (element de composition multiple)

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Bois lourd	24.0	0.230	650	0.667	0.96	1.04
Total					0.96	1.04

Bois + laine de verre (element de composition multiple)

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Bois lourd	2.0	0.230	650	0.667	11.50	0.09
Laine de verre	22.0	0.041	12	0.233	0.19	5.37
Total					0.18	5.45

plancher multiple

Composante	Taux
Bois 1 (element de composition multiple)	9.90%
Bois + laine de verre (element de composition multiple)	85.00%
plaque de plâtre(element de composition multiple)	5.10%

Toiture terrasse végétalisées

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Argile ou limon	8.0	1.500	1500	0.579	18.75	0.05
Feutre bitumeux	0.1	0.500	1700	0.278	500.00	0.00
Panneau de laine de bois agglomérés	20.0	0.100	525	0.472	0.50	2.00
Total					0.49	2.06

Toiture terrasse isolée FCMB

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Feutre bitumeux	0.1	0.500	1700	0.278	500.00	0.00
Polyuréthane TMS	4.0	0.025	30	0.420	0.63	1.60
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11

Laine de verre	20.0	0.041	12	0.233	0.20	4.88
Plaque de plâtre 13 mm	1.3	0.325	850	0.222	25.00	0.04
Total					0.15	6.63

plaque de plâtre(element de composition multiple)

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Plaque de plâtre 13 mm	1.3	0.325	850	0.222	25.00	0.04
Total					25.00	0.04

Fenêtres et portes

Fen bat alu SV

Caractéristiques globales	Nombre vitrages	Coeff Uw (W/(m ² .K))	Facteur Solaire Sw
	1	4.73	0.63

Fen bat alu rupt 4/16/4 S=0.15

Caractéristiques globales	Nombre vitrages	Coeff Uw (W/(m ² .K))	Facteur Solaire Sw
	2	1.80	0.17

Fen bat alu rupt 4/16/4 S=0.08

Caractéristiques globales	Nombre vitrages	Coeff Uw (W/(m ² .K))	Facteur Solaire Sw
	2	1.65	0.08

Portes

Nom	Coeff U en W/(m ² .K)
Portail métallique	7.00
Porte bois isolante performante	0.80

Systemes

Générateurs

Equipements photovoltaïques

Systemes photovoltaïques

Systeme polycristallin

Connexion à l'onduleur	Par défaut
Onduleur	
Pertes	Pertes ohmiques 3 % - Pertes mismatch 0 %
Modules	Polycristallin
Nombre de branches (string)	0
Nombre de modules en séries	0

Description du projet

Récapitulatif des zones thermiques et pièces

Zone	Pièces	Surface (m ²)	Volume (m ³)
	Exposition_ accueil	390.40 m ²	1493.58 m ³
	RDC - 2 - Exposition	223.77 m ²	593.00 m ³
	R+1 - 22 - Vide sur hall	0.00 m ²	351.20 m ³
	R+1 - 26 - Galerie	87.63 m ²	210.32 m ³
	R+2 - 30 - Vide sur accueil	0.00 m ²	91.87 m ³
	R+2 - 33 - Circulation R+2	79.00 m ²	197.13 m ³
	R+2 - 34 - Escalier R+2	0.00 m ²	50.07 m ³
	Vestiaires hommes+Vestiaires femmes	81.50 m ²	215.97 m ³
	RDC - 15 - Vestiaires hommes	40.75 m ²	107.98 m ³
	RDC - 16 - Vestiaires femmes	40.75 m ²	107.98 m ³
	Dessin GO	42.10 m ²	111.60 m ³
	RDC - 8 - Dessin GO	42.10 m ²	111.60 m ³
	Réunion R+1	37.05 m ²	88.92 m ³
	R+1 - 21 - Réunion R+1	37.05 m ²	88.92 m ³
	Ouverture sur le monde	121.88 m ²	292.51 m ³
	R+1 - 24 - Ouverture sur le monde	121.88 m ²	292.51 m ³
	Direction 1	21.00 m ²	52.41 m ³
	R+2 - 31 - Direction 1	21.00 m ²	52.41 m ³
	Direction 2	18.80 m ²	46.96 m ³
	R+2 - 29 - Direction 2	18.80 m ²	46.96 m ³
	Comptabilité	20.20 m ²	50.51 m ³
	R+2 - 42 - Comptabilité	20.20 m ²	50.51 m ³
	Réunion R+2	29.90 m ²	74.60 m ³
	R+2 - 35 - Réunion R+2	29.90 m ²	74.60 m ³
	Salle Dessin Maquette Informatique	306.30 m ²	763.28 m ³
	R+2 - 37 - Salle Dessin Maquette Informatique	306.30 m ²	763.28 m ³
	Physique	46.40 m ²	115.42 m ³
	R+2 - 44 - Physique	46.40 m ²	115.42 m ³
	Maths	46.40 m ²	115.49 m ³
	R+2 - 45 - Maths	46.40 m ²	115.49 m ³
	Langues	47.30 m ²	116.99 m ³
	R+2 - 46 - Langues	47.30 m ²	116.99 m ³
	Examen	45.80 m ²	113.49 m ³
	R+2 - 47 - Examen	45.80 m ²	113.49 m ³
	Centre de ressources	49.20 m ²	121.99 m ³
	R+2 - 48 - Centre de ressources	49.20 m ²	121.99 m ³
	Formateur	54.40 m ²	136.57 m ³
	R+2 - 38 - Formateur	54.40 m ²	136.57 m ³
	Pole Second Oeuvre	258.70 m ²	646.63 m ³
	R+2 - 41 - Pole Second Oeuvre	258.70 m ²	646.63 m ³
	Détente	93.60 m ²	232.17 m ³
	R+2 - 43 - Détente	93.60 m ²	232.17 m ³
	Atelier + locaux annexes	1847.97 m ²	7645.68 m ³
	RDC - 9 - Ateliers	1304.59 m ²	3457.16 m ³
	RDC - 10 - Stockage GO	57.40 m ²	152.11 m ³
	RDC - 11 - Dechets sélectifs	9.15 m ²	24.24 m ³
	RDC - 12 - Chaufferie	30.78 m ²	81.57 m ³
	RDC - 13 - Stockage	36.66 m ²	97.14 m ³
	RDC - 14 - TGBT	19.02 m ²	50.40 m ³
	RDC - 17 - Outillage GO	36.55 m ²	96.86 m ³
	RDC - 18 - Outillage 3 métiers	83.03 m ²	220.03 m ³
	RDC - 19 - Entretien	13.49 m ²	35.76 m ³
	R+1 - 25 - Vide sur ateliers	0.00 m ²	2811.00 m ³
	R+1 - 27 - Circulations atelier	216.90 m ²	518.12 m ³

R+2 - 50 - Escalier Ouest	40.40 m ²	101.27 m ³
Locaux techniques + sanitaires	80.82 m ²	229.17 m ³
RDC - 1 - Réserve	16.14 m ²	42.76 m ³
RDC - 3 - Sanitaires RDC	20.33 m ²	53.88 m ³
RDC - 4 - Ascenseur RDC	4.75 m ²	12.59 m ³
R+1 - 20 - Sanitaires R+1	19.90 m ²	47.68 m ³
R+1 - 23 - Ascenseur R+1	0.00 m ²	11.27 m ³
R+2 - 28 - Sanitaires R+2	19.70 m ²	49.44 m ³
R+2 - 32 - Ascenseur R+2	0.00 m ²	11.55 m ³
Sanitaires R+2	30.30 m ²	74.92 m ³
R+2 - 49 - Sanitaires R+2	30.30 m ²	74.92 m ³
Archives + Réserve pédagogique	53.30 m ²	140.60 m ³
R+2 - 36 - Archives	13.00 m ²	32.35 m ³
R+2 - 39 - Archives pédagogique	17.10 m ²	46.03 m ³
R+2 - 40 - Réserve pédagogique	23.20 m ²	62.21 m ³
Dessin couverture	45.42 m ²	120.40 m ³
RDC - 5 - Dessin couverture	45.42 m ²	120.40 m ³
Dessin Charpente	48.34 m ²	128.10 m ³
RDC - 6 - Dessin Charpente	48.34 m ²	128.10 m ³
Dessin menuiserie	45.31 m ²	120.10 m ³
RDC - 7 - Dessin menuiserie	45.31 m ²	120.10 m ³

Fonctionnement

Exposition_ accueil

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Exposition_ accueil
Occupation	FCMB Hall accueil Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration	0.20 vol/h	
Puissance dissipée	Puissance Accueil Annuel	

Vestiaires hommes+Vestiaires femmes

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Vestiaires hommes+Vestiaires femmes
Occupation	FCMB Vestiaires Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
Infiltration	0.20 vol/h	

Dessin GO

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Dessin GO
Occupation	FCMB Salles de dessin G.O. Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Dessin GO' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' >

		température de la zone 'Dessin GO' + 1 °C Temperature de la zone ' Dessin GO ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Dessins RDC Annuel	

Réunion R+1

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Réunion R+1
Occupation	FCMB Salle de réunion R+1 Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Réunion R+1' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Réunion R+1' + 1 °C Temperature de la zone ' Réunion R+1 ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Réunion Annuel	

Ouverture sur le monde

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Ouverture sur le monde
Occupation	FCMB Ouverture sur le monde Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Ouverture sur le monde' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Ouverture sur le monde' + 1 °C Temperature de la zone ' Ouverture sur le monde ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%

	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Ouverture sur le monde Annuel	

Direction 1

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Direction 1
Occupation	FCMB DirectionAnnuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Direction 1' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Direction 1' + 1°C Temperature de la zone ' Direction 1 ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Direction 1 Annuel	

Direction 2

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Direction 2
Occupation	FCMB DirectionAnnuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Direction 2' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Direction 2' + 1°C Temperature de la zone ' Direction 2 ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Direction 2 Annuel	

Comptabilité

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Comptabilité
Occupation	FCMB Comptabilité Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	

Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Comptabilité' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Comptabilité' + 1 °C Temperature de la zone 'Comptabilité' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Comptabilité Annuel	

Réunion R+2

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Réunion R+2
Occupation	FCMB Salle de réunion R+2 Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Réunion R+2' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Réunion R+2' + 1 °C Temperature de la zone ' Réunion R+2 ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Réunion Annuel	

Salle Dessin Maquette Informatique

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Salle Dessin Maquette Informatique
Occupation	FCMB Salle Dessin Maquette Informatique Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Salle Dessin Maquette Informatique' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Salle Dessin

		Maquette Informatique' + 1 °C Temperature de la zone ' Salle Dessin Maquette Informatique ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur- récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Dessin Maquette Informatique Annuel	

Physique

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Physique
Occupation	FCMB Physique Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Physique' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Physique' + 1 °C Temperature de la zone ' Physique ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur- récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Physique Annuel	

Maths

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Maths
Occupation	FCMB Maths Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Maths' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Maths' + 1 °C Temperature de la zone ' Maths ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur- récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h

Puissance dissipée	Puissance Maths Annuel
--------------------	------------------------

Langues

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Langues
Occupation	FCMB Langues Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Langues' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Langues' + 1 °C Temperature de la zone ' Langues ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration	0.20 vol/h	
Puissance dissipée	Puissance Langues Annuel	

Examen

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Examen
Occupation	FCMB Salle d'examen Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Examen' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Examen' + 1 °C Temperature de la zone ' Examen ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration	0.20 vol/h	
Puissance dissipée	Puissance Salle d'examen Annuel	

Centre de ressources

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Centre de ressources
Occupation	FCMB Centres de ressources Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' <

		température de la zone 'Centre de ressources' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Centre de ressources' + 1 °C Temperature de la zone ' Centre de ressources ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Centre de ressource Annuel	

Formateur

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Formateur
Occupation	FCMB Formateur Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Formateur' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Formateur' + 1 °C Temperature de la zone ' Formateur ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration		0.20 vol/h
Puissance dissipée	Puissance Dessin Formateur Annuel	

Pole Second Oeuvre

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Pole Second Oeuvre
Occupation	FCMB Pole second oeuvre Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Pole Second Oeuvre' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Pole Second Oeuvre' + 1 °C Temperature de la zone ' Pole

	Second Oeuvre ' < 24 °C	
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration	0.20 vol/h	
Puissance dissipée	Puissance Pôle second oeuvre Annuel	

Détente

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Détente
Occupation	FCMB Détente Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Détente' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Détente' + 1°C Temperature de la zone ' Détente ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration	0.20 vol/h	
Puissance dissipée	Puissance Détente Annuel	

Atelier + locaux annexes

Scénarios	Nom	
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB Atelier	
Infiltration	0.20 vol/h	
Puissance dissipée	Puissance Atelier Annuel	

Locaux techniques + sanitaires

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Locaux techniques + sanitaires
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
Infiltration	0.20 vol/h	

Sanitaires R+2

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Sanitaires R+2
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
Infiltration	0.20 vol/h	

Archives + Réserve pédagogique

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Archives + Réserve pédagogique

Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h
Infiltration	0.20 vol/h

Dessin couverture

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Dessin couverture
Occupation	FCMB Salles de dessin Couverture Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Dessin couverture' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Dessin couverture' + 1 °C Temperature de la zone ' Dessin couverture ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration	0.20 vol/h	
Puissance dissipée	Puissance Dessins RDC Annuel	

Dessin Charpente

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Dessin Charpente
Occupation	FCMB Salles de dessin Charpente Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Dessin Charpente' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Dessin Charpente' + 1 °C Temperature de la zone ' Dessin Charpente ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration	0.20 vol/h	
Puissance dissipée	Puissance Dessins RDC Annuel	

Dessin menuiserie

Scénarios	Nom	
Consigne de température	Chauffage 19°C FCMB	Position du thermostat : Dessin menuiserie

Occupation	FCMB Salles de dessin Menuiserie Annuel	
Ventilation Externe	Ventilation FCMB 2 vol/h	
Contrôle	Ventilation FCMB 2 vol/h	Condition de mise en marche : Température de la zone 'Extérieur' < température de la zone 'Dessin menuiserie' + 1°C Conditions d'arrêt : Température de la zone 'Extérieur' > température de la zone 'Dessin menuiserie' + 1 °C Temperature de la zone ' Dessin menuiserie ' < 24 °C
Ventilation externe non-contrôlée	Ventilation FCMB 1 vol/h	
	Efficacité de l'échangeur-récupérateur du scénario 2 :	90%
	ByPass	Première semaine : 18 Dernière semaine : 42
Infiltration	0.20 vol/h	
Puissance dissipée	Puissance Dessins RDC Annuel	

Systemes

Synthèse bâti

Orientation générale

Orientation °	Surface brute m ²	Surface opaque m ²	Surface vitrée m ²	Pourcentage %
Vertical sud	325.26	231.14	94.12	28.94
Vertical Est	655.19	480.17	175.03	26.71
Vertical nord	350.41	255.41	94.99	27.11
Vertical ouest	486.02	295.18	190.84	39.27
Toiture sud	2233.20	2153.20	80.00	3.58
Toiture Est	0.00	0.00	0.00	0.00
Toiture nord	263.39	105.51	157.88	59.94
Toiture ouest	0.00	0.00	0.00	0.00

Compositions

Composition	Surface interne m ²	Surface externe m ²	R (m ² .K)/W
Plancher TP isolé UNIMAT SOL 70mm	2118.32	0.00	2.66
Bois 1 (element de composition multiple)	25.03	0.00	1.04
Bois + laine de verre (element de composition multiple)	214.88	0.00	5.45
plaque de plâtre(element de composition multiple)	12.89	0.00	0.04
Toiture terrasse bac acier FCMB	0.00	1026.21	4.91
Béton plein + Pregymax 32 100+13	229.60	845.09	3.28
Porte bois isolante performante	139.13	20.40	1.25
Cloison BA13 + LDV 45mm + BA13	687.53	0.00	1.18
Toiture terrasse isolée FCMB	0.00	271.00	6.63
Fen bat alu rupt 4/16/4 S=0.15	0.00	368.06	0.56

Fen bat alu rupt 4/16/4 S=0.08	0.00	270.88	0.61
dalle béton + parquet pin massif	1278.80	212.46	0.24
Portail métallique	0.00	212.10	0.14
Béton plein 20cm	369.22	184.30	0.11
Toiture terrasse non isolée	0.00	228.60	0.12
Toiture terrasse végétalisées	0.00	732.90	2.06
Fen bat alu SV	0.00	153.92	0.21

Parois opaques

Orientation °	Inclinaison °	Surface brute m ²	Surface nette m ²
0.00	0.00	1970.50	1890.50
-157.00	90.00	27.18	27.18
24.00	90.00	102.11	41.63
-66.00	90.00	21.14	18.55
-90.00	90.00	555.64	413.44
-156.00	90.00	90.73	26.86
180.00	90.00	220.85	189.72
23.00	90.00	110.66	100.58
0.00	90.00	100.92	77.36
90.00	90.00	416.57	240.85
158.00	90.00	6.35	6.35
146.00	90.00	5.29	5.29
130.00	90.00	4.61	4.61
110.00	90.00	4.30	4.30
70.00	90.00	4.30	4.30
49.00	90.00	4.53	4.53
32.00	90.00	5.21	5.21
21.00	90.00	6.35	6.35
-67.00	90.00	76.44	46.20
0.00	180.00	212.46	212.46
114.00	90.00	15.42	15.42
113.00	90.00	27.91	12.79
-91.00	90.00	1.98	1.98
115.00	90.00	8.38	8.38
0.00	47.00	233.90	233.90
180.00	47.00	263.39	105.51
0.00	48.00	28.80	28.80

Vitrages

Orientation °	Inclinaison °	Surface m ²
-90.00	90.00	142.20
-156.00	90.00	63.87
0.00	90.00	23.56
180.00	90.00	31.12
24.00	90.00	60.48
-67.00	90.00	30.24
-66.00	90.00	2.59
113.00	90.00	15.12
90.00	90.00	175.72
23.00	90.00	10.08
0.00	0.00	80.00
180.00	47.00	157.88

Document réalisé dans le cadre du **projet BAZED** (Bâtiment zéro Déchet).

Le projet BAZED a été cofinancé par les partenaires du projet et par l'ADEME dans le cadre du Programme *Déchets du BTP* 2012.

Partenaires :



(Coordinateur)
**Centre Technologique de la
Construction Durable NOBATEK**
67 rue de Mirambeau
64600 Anglet
Tel. 05 59 03 61 29
Mail. contact@nobatek.com
M. Benjamin LACLAU



Agence XB Architectes
16, Rue Charles FLOQUET
64100 Bayonne
Tel. 05 59 48 12 51
Mail. annecoyola@xb-architectes.com
Mme Anne COYOLA



ARMINES
60, boulevard Saint-Michel
75272 Paris
Tel. 01 40 51 90 50
Mail. bruno.peuportier@mines-paristech.fr
M. Bruno PEUPORTIER