

Projet : LowCal, étude du premier bâtiment E4C2 pour massifier la réalisation, à coût maîtrisé, du bâtiment à énergie positive, bas carbone, low-tech, local et sans chauffage

Synthèse de l'étude

Etude réalisée par ENERTECH avec le soutien de l'ADEME, dans le cadre de son appel à projet recherche « vers les bâtiments responsables à l'horizon 2020 »



Coordination technique ADEME:

Romuald CAUMONT

romuald.caumont@ademe.fr

01 47 65 21 49

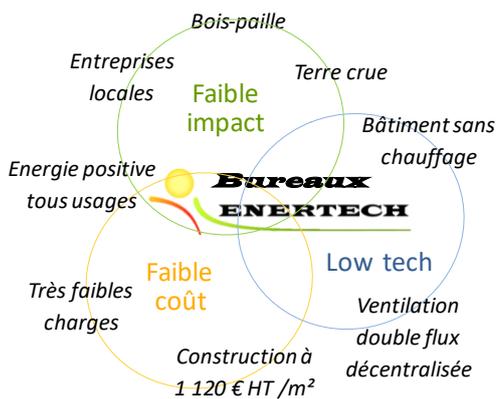
| Version | Rédigé par | Relu par | Date |
|---------|------------|------------|------------|
| 2 | LF | OG, PC, TR | 17/08/2020 |

LowCal – Un bâtiment riche d'enseignements

LowCal est un bâtiment livré en 2016, et qui est depuis le siège de notre SCOP Enertech. Nous avons conçu ce bâtiment avec l'architecte Pierre Traversier et notre équipe de maîtrise d'œuvre afin d'en faire un bâtiment exemplaire tant sur le plan énergétique qu'environnemental, tout en se fixant un budget très contraint de 1200 €/m² SHON hors VRD.



Aujourd'hui ce bâtiment nous donne pleinement satisfaction, tant pour le confort d'usage que pour ses performances mesurées. C'est aussi un bâtiment pionnier, le premier (et encore aujourd'hui le seul) à avoir été labellisé au niveau E4C2 du label E+C-, soit le plus haut niveau sur le plan de l'énergie et du bilan carbone. Et ceci pour un coût de construction qui s'est même avéré inférieur à notre objectif.



Souhaitant reproduire le concept « LowCal », résumé par le schéma ci-contre, nous avons sollicité le soutien de l'ADEME pour une étude mêlant campagne de mesure et modélisation de différents aspects du bâtiment.

Aussi nous remercions grandement l'ADEME pour son soutien dans le cadre de son appel à projet recherche « vers les bâtiments responsables à l'horizon 2020 », qui a rendu possible ce vaste retour d'expérience.

Le présent document est une synthèse de l'ensemble des études réalisées dans ce cadre. Les différentes parties sont rédigées sous forme d'articles qui ont pour objectif de fournir un résumé grand public des messages clés, et de renvoyer à la lecture des rapports techniques disponibles sur notre site internet www.enertech.fr. L'ensemble de l'étude est structuré en différents rapports :

- La présente Synthèse
- Tâche 1 : Low-Tech
 - T1-1 - Description du bâtiment
 - T1-2 - Consommation Mesurée – Campagne de mesure
 - T1-3 – Retour d'expérience par Simulation Thermique Dynamique – Validation du modèle STD et analyse détaillée du comportement hygrothermique
- Tâche 2 : High Confort

- T2-1 - Confort Thermique – Analyse par la mesure du confort d’été et d’hiver
- T2-2 - Rapport mesure Qualité de l’Air Intérieur – Réalisé par Médiéco
- T2-3 - Confort visuel – Satisfaction des usagers, mesure et modélisation du confort visuel
- Tâche 3 : Low Cost et Tâche 4 : Low Impacts
 - T3 et 4 – Définition d’une variante RT2012, Analyse de Cycle de Vie et Coût global
- Tâche 5 : High Expérience
 - T5-1 - Contraintes techniques – Difficultés de conception et retour d’expérience
 - T5-2 – Généralisation – Exploration par STD du concept LowCal sous d’autres climats et en résidentiel

Les références, sous le format [n° du rapport / et le cas échéant n° de la section], présentes dans le texte ont pour vocation de permettre aux personnes souhaitant approfondir certains sujets de les consulter pour en obtenir des explications détaillées.

Nous serons par ailleurs, attentifs à toutes remarques constructives pouvant les enrichir. La grande spécificité de ce retour d’expérience est qu’il s’appuie sur une importante campagne de mesures ([T1-2] pour l’énergie, [T2-1] pour le confort et [T2-2] pour la qualité d’air intérieure. Les résultats obtenus et présentés sont donc issus du comportement réel et mesuré du bâtiment, enrichis par des données de simulation étalonnée sur les données des mesures (voir notamment [T1-3]) et pour certaines analyses ramenés à un usage plus standard (variante « générique » du LowCal définie au [T5-2]).

1 Un bâtiment à énergie grise positive

A l’occasion d’un changement de locaux, notre bureau d’études [Enertech](#) s’est lancé un défi : celui de réaliser un bâtiment à **énergie grise positive**, dénommé LowCal.

Précisons tout d’abord ce que ce terme signifie. Nous détaillerons ensuite à travers plusieurs articles toutes les stratégies mises en œuvre pour atteindre cet objectif.

Energie positive

Un bâtiment est dit à **énergie positive** lorsqu’il produit plus d’énergie qu’il n’en consomme. La définition que nous utilisons est basée sur tous les usages, et pas seulement les 5 usages du calcul réglementaire. Cette définition est ainsi comparable au niveau E4 du label E+C- par exemple. L’énergie consommée dans un bâtiment est principalement due aux usages de ses occupants : chauffage, éclairage, appareils électriques (ordinateurs, machines, etc.). Usuellement, cette énergie est prélevée sur le réseau, lorsqu’elle est électrique ou issue du gaz de ville, ou dans des stocks (cuve de fioul ou de gaz), et donc non produite sur place. La priorité pour un bâtiment à énergie positive est de réduire le plus possible ses consommations, puis d’introduire dans le bâtiment des systèmes capables de produire de l’énergie à partir de sources renouvelables, tels que, classiquement, les panneaux solaires photovoltaïque (électricité) ou thermique (eau chaude).

L’objectif d’un bâtiment à énergie positive est donc de couvrir ses besoins énergétiques grâce à l’énergie produite sur place¹. Si surplus de production il y a, cette énergie pourra être injectée dans le réseau et servir aux besoins énergétiques d’autres bâtiments, voisins ou non. Un bâtiment à énergie positive ne

¹ Il ne s’agit pas forcément d’autonomie, car la production n’est pas forcément concomitante avec la consommation. Etude détaillée de l’autoconsommation et autoproduction au [T1-2 / §4.8.2].

contribue donc pas à accroître la consommation énergétique globale. Il participe au contraire au développement des énergies renouvelables décentralisées.

Energie grise

Le terme **énergie grise** désigne l'énergie « investie » dans un objet, c'est-à-dire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.

Pour un bâtiment, c'est donc la somme des énergies consommées pour la fabrication, le transport, la mise en œuvre de tous les processus et de tous les matériaux nécessaires à sa construction.

Dans un bilan « énergie grise positive », il convient d'inclure également l'énergie consommée pour le remplacement nécessaire de ces éléments au cours de la vie estimée du bâtiment, ainsi que leur destruction en fin de vie.

Un **bâtiment à énergie grise positive** est donc un bâtiment dont la production d'énergie compense à terme l'énergie qui a été nécessaire à sa construction et à sa maintenance, en plus de couvrir ses besoins énergétiques. Autrement dit, un tel bâtiment, sur sa durée de vie, aura produit plus d'énergie, qu'il n'en aura consommée pour sa construction et son utilisation. En définitive, l'empreinte énergétique de ce bâtiment sera donc nulle, et de plus, l'énergie excédentaire pourra venir en substitution à d'autres sources d'énergie, potentiellement carbonées et/ou non renouvelables.

Production versus consommation

Pour le LowCal, les mesures ont montré que, sur les 2 premières années de fonctionnement, le bâtiment a produit, grâce à sa toiture photovoltaïque, 6 fois plus d'énergie électrique qu'il n'en a consommée, tous usages confondus [T1-2 / §4.8.1].

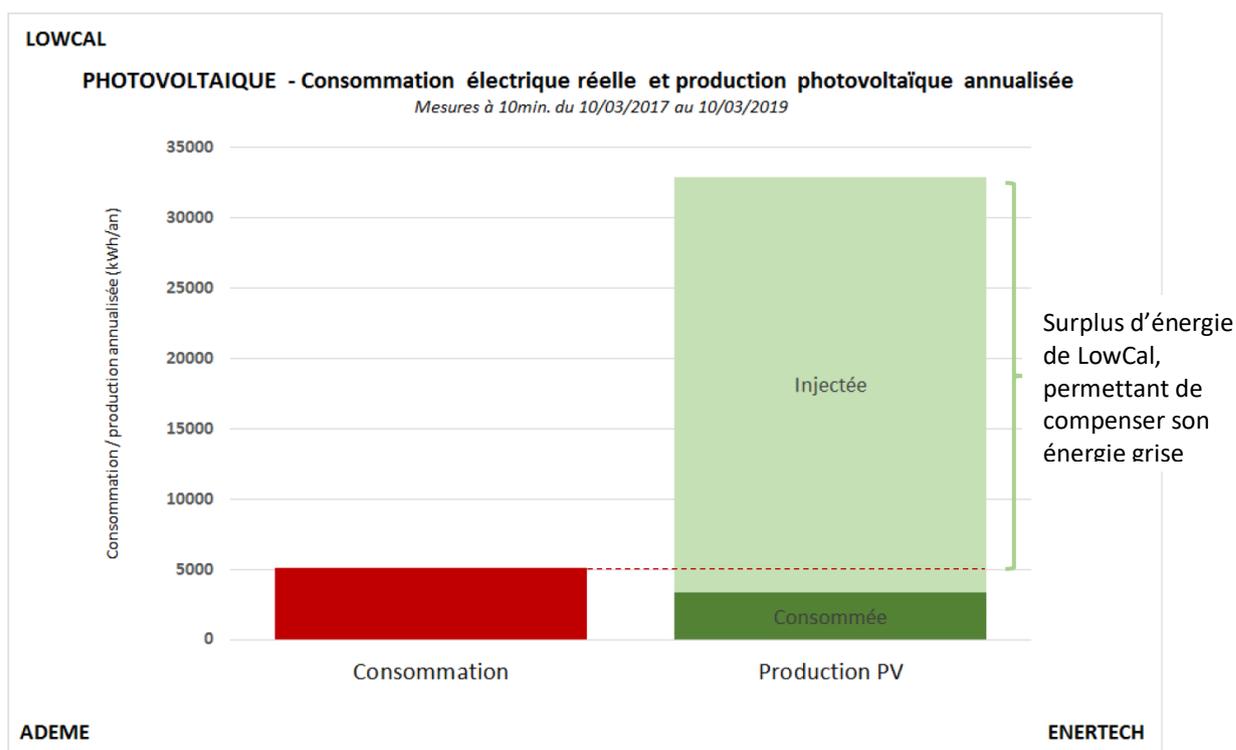


Figure 43 du rapport T1-2 : Consommation électrique et production photovoltaïque, mesure de mars 2017 à mars 2019. Le barreau vert clair représente l'électricité exportée sur le réseau.

Le calcul en cycle de vie nous permet d'en déduire que **ce surplus de production compensera² l'énergie grise investie dans la construction et l'entretien du bâtiment** (consommation + fabrication) **au bout de 37 ans**, soit bien avant sa durée de vie conventionnelle de 50 ans [T3-2 / §4.2.2].

Au bout de cette durée de vie, justement, le surplus d'énergie produite restant pourrait même compenser 37% de l'énergie grise d'un nouveau LowCal [T3-2 / §4.2.2]. Dit autrement : « pour 3 LowCaux³ construits, l'énergie grise du 4^{ème} sera intégralement compensée » !

Notons, avant de conclure sur cette première partie, que le surplus d'énergie produit par l'installation photovoltaïque pourrait par ailleurs compenser la mobilité des employés pour les trajets domicile-travail et les déplacements professionnels [T1-2 / §4.8.3] (mais pas en même temps rembourser l'énergie grise de la construction). L'étude de l'empreinte des bâtiments intégrant la mobilité qu'il engendre est un sujet intéressant⁴, cependant nous restons convaincus qu'un bilan Transports n'a que peu de sens s'il n'intègre que la mobilité des personnes et pas la mobilité des biens. Ainsi notre implantation rurale implique des déplacements de personne domicile-travail, mais sans doute bien moins de déplacement de biens notamment en termes d'alimentation locale. Seul un bilan carbone des salariés et de l'entreprise apporterait selon nous une vision cohérente sur cette question.

L'un des premiers bâtiments à énergie grise positive

Pari tenu donc pour le LowCal, qui est l'un des premiers bâtiments à **énergie grise positive** de France. Nous détaillerons dans de prochains articles les stratégies de conception ayant permis d'y parvenir, en suivant le triptyque développé par le concept [négaWatt](#) : sobriété, efficacité, énergie renouvelable.

² D'un point de vue purement arithmétique et théorique, sans prise en compte de la concomitance entre consommation et production et donc gestion du réseau (stockage, etc.) ;

³ Oui, l'académie française a tranché : « un LowCal, des LowCaux ».

⁴ Bien conscients de cela, nous privilégions largement le train pour les déplacements professionnels et le vélo et le co-voiturage pour les trajets domicile-travail.

2 Un bâtiment à faible énergie grise et bas carbone

L'une des pistes suivies pour atteindre un bilan positif en énergie grise pour le LowCal a été de minimiser l'énergie grise des matériaux utilisés pour sa construction, et de façon générale de **minimiser l'impact environnemental de la construction**, soit une démarche de **sobriété constructive**. Pour y parvenir :

- Des matériaux locaux ont été choisis, afin de réduire l'impact du transport ;
- Des matériaux bio et géo-sourcés⁵, mis en œuvre de façon relativement « brute », ont été privilégiés pour limiter l'impact des process de transformation.

Ces deux aspects concourent aussi à l'atteinte d'un niveau bas carbone. En effet, d'une part, une faible énergie grise diminue mécaniquement les émissions associées de gaz à effet de serre, et, d'autre part, les matériaux bio-sourcés contribuent à stocker du carbone (dit « biogénique », c'est-à-dire capté lors de la croissance des plantes utilisées).

Concrètement, dans Lowcal, ces matériaux sont :

- Du bois pour la structure et en complément d'isolation (fibre de bois) ;
- De la paille pour l'isolation, sous-produit de l'agriculture de proximité ;
- De la terre crue pour l'inertie, pour partie (35 tonnes) prélevée sur place dans les terres d'excavation et façonnée sous forme de briques (adobes), utilisée en parement intérieur ; une autre partie de la terre crue utilisée (60 tonnes) provient de rebuts de fabrication artisanale de brique d'argile compressée ;
- Du papier recyclé (ouate de cellulose) pour l'isolation des combles.



Structure bois en cours de montage.



Fabrication des caissons de façade avec remplissage paille.



Grutage des caissons préfabriqués de façade.

⁵ Matériaux bio-sourcé : matériaux ou produit entièrement ou partiellement fabriqué à partir de matière d'origine biologique
 Matériaux géo-sourcé : matériaux ou produit entièrement ou partiellement fabriqué à partir de matière d'origine minérale, avec un minimum de transformation. Le géo-sourcé regroupe ainsi différentes techniques de terre crue (pisé, bauge, adobe, brique d'argile compressée, enduits de terre crue etc.), ayant un rôle structurel ou non.



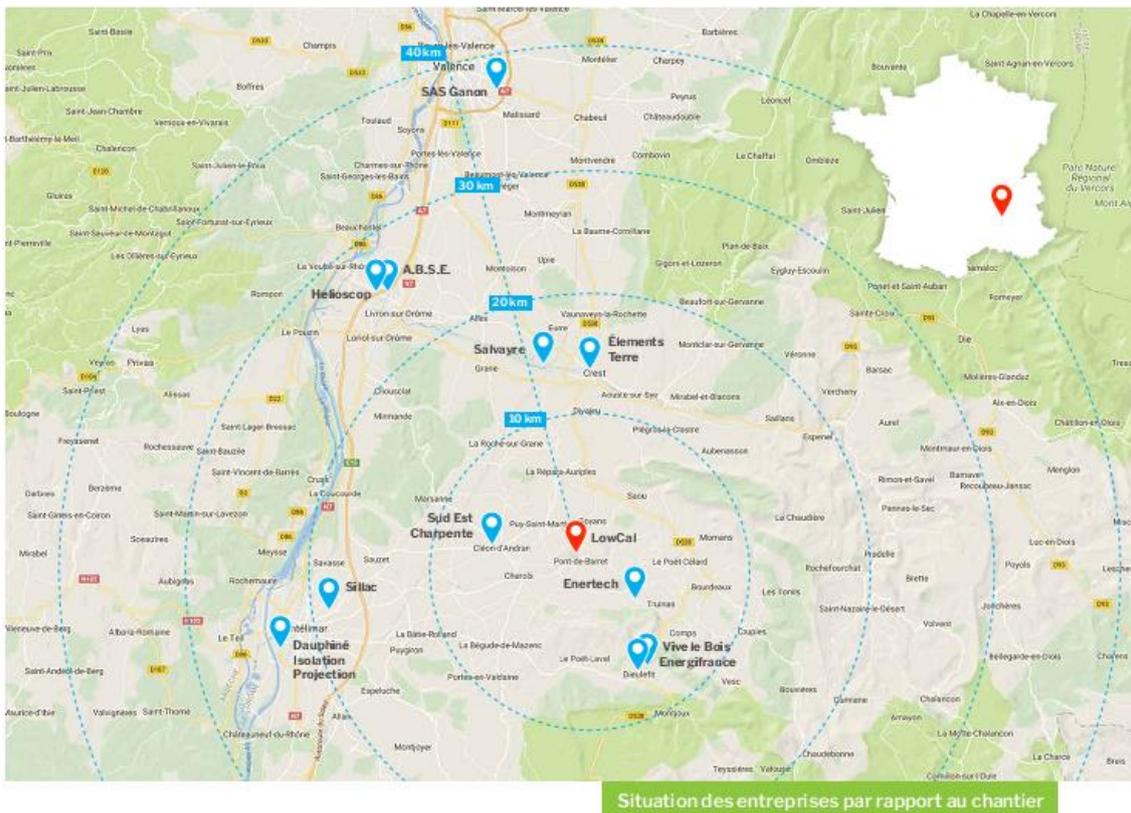
Fabrication des briques de terre crue (adobes) avec la terre excavée sur site.



Mise en œuvre des rebuts de brique d'argile compressée en remplissage de plancher.

Matériaux ET entreprises locales

Le choix du local⁶ ne s'est pas cantonné à la sélection des matériaux, mais aussi à la sélection des entreprises qui sont intervenues dans les travaux. Pour l'essentiel, elles se situent **dans un rayon de 40 km du chantier**. Ce choix entraîne, *de facto*, une minimisation des distances parcourues par les entreprises pour rejoindre le chantier de construction de LowCal.



Les retombées économiques bénéficient ainsi principalement au territoire local. Nous avons ainsi pu estimer [T3 et 4 / §5.2] que 40% du coût travaux est investi au niveau du département, 10% au niveau de la région, et encore 9% au niveau national. Seuls 29% des coûts sont investis au niveau Européen et 12% au niveau mondial. La référence RT2012 en béton et polystyrène présenterait au contraire une majorité de coûts investis au niveau Européen (41%) et mondial (22%).

⁶ A rapprocher avec le nom du bâtiment, à prononcer avec un bon accent français.

Un impact notable

Pour en revenir à l'énergie grise, nous avons été surpris de constater que ces choix de matériaux ne permettent de réduire que de 5% l'énergie grise du bâtiment (hors consommations et installation photovoltaïque) par rapport à une réalisation équivalente avec des procédés constructifs bien plus conventionnels (murs béton, isolation en polystyrène, etc. [T3 et 4 / §4.1]), notamment à cause de la part conséquente du gros œuvre du demi-niveau enterré⁷. Cette réduction de 5% mesure l'impact de la **sobriété constructive**.

Les installations climatiques et les différences de consommation permettent toutefois de creuser l'écart en **bilan énergie grise** jusqu'à 15% hors énergie grise et production de l'installation photovoltaïque. Rappelons que la consommation d'énergie prise en compte ici est une variante « générique » neutralisant la *sobriété d'usage* du bâtiment réel. On mesure ici l'impact de **l'efficacité énergétique** du bâtiment.

En tout état de cause, cette énergie grise est intégralement compensée par la production énergétique du système photovoltaïque, faisant du LowCal un bâtiment à énergie grise positive. C'est l'étape de la **production d'énergie renouvelable**, qui complète ainsi le triptyque de la démarche **négaWatt**, rappelé ci- contre.

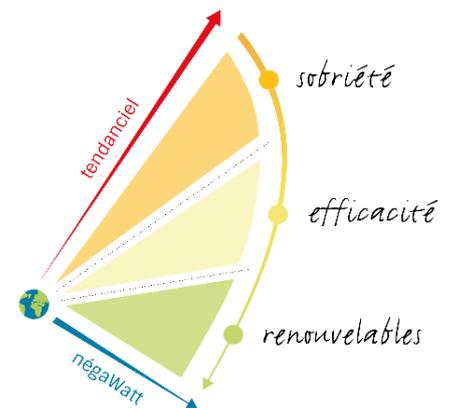


Illustration de la démarche négaWatt.

L'impact des choix des matériaux se manifeste bien plus nettement sur le **bilan carbone**. En effet, l'impact de LowCal sur l'ensemble de son cycle de vie est plus faible **d'un facteur 1,33 à 3,7 selon la méthodologie retenue** (1,33 pour la méthode E+C- avec la base de données INIES, facteur 3,7 pour le logiciel e-LICCO, avec la base de données ecoinvent adaptée au contexte français, avec la prise en compte notamment du carbone biogénique), par rapport à une réalisation équivalente avec des procédés constructifs plus conventionnels (voir [T3 et 4 / §1.1] pour la définition de la variante fictive RT2012, [T3 et 4 / §3] pour la méthodologie et les résultats détaillés).

Dans le détail, le bilan carbone (avec base INIES) des murs extérieurs bois-paille est 2 fois moindre que la version béton-polystyrène, et celui des planchers intérieurs bois remplissage terre crue est inférieur de 60% à la version béton. On note également que le triple vitrage cadre bois du LowCal a un impact 2 fois inférieur à celui de la variante supposée en double vitrage cadre aluminium [T3 et 4 / §3.4].

⁷ Notons que certaines hypothèses imposées par les moteurs de calcul d'analyse de cycle de vie (réglementaire et/ou alternatif (e-licco)) n'ont pas toujours permis de prendre en compte la réalité des choix retenus (utilisation des terres excavées par exemple).

Une performance reconnue

Ces performances ont été reconnues grâce à l'obtention des labels « **Bâtiment Bas Carbone (BBCA) niveau Excellence** », « **BEPOS+ Effinergie 2017** », et « **E4C2** » du label **E+C-**⁸.



Selon les statistiques de l'observatoire des bâtiments bas carbone le LowCal reste, à date de Juillet 2020, **le premier et le seul bâtiment** ayant atteint ce plus haut niveau (E4 = 4^{ème} et plus bas niveau de consommation énergétique, correspondant aux bâtiments à énergie positive ; C2 = 2^{ème} et plus bas niveau carbone).

| | C ₀ | C ₁ | C ₂ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| E ₀ | 54 | 52 | - |
| E ₁ | 55 | 64 | 4 |
| E ₂ | 175 | 402 | 44 |
| E ₃ | 41 | 186 | 76 |
| E ₄ | 5 | 2 | 1 |

Nombre de bâtiments du programme E+C- classés en fonction de leurs performances Energie (en ligne) et Carbone (en colonne). Source : <http://observatoire.batiment-energiecarbone.fr/statistiques/experimentation-en-chiffres/> (visité le 11/08/2020).

Matériaux écologiques ET performants !

En définitive, bien que relativement « rustiques » ces matériaux, qui réduisent fortement l'empreinte énergétique et carbone du bâtiment, offrent également une performance thermique poussée, comme détaillée dans les articles suivants, ce qui contribue aussi à la minimisation du bilan « énergie grise positive » du bâtiment par la réduction des consommations et la simplification et la réduction de l'énergie grise des systèmes climatiques.

⁸ Expérimentation préfigurant la future réglementation du bâtiment et visant notamment à intégrer leur empreinte carbone. Pour plus d'informations : <http://www.batiment-energiecarbone.fr/>

3 Un bâtiment chauffé par le soleil

Premier poste de consommation dans les bâtiments existants⁹, le **chauffage** doit nécessairement être minimisé pour obtenir un bâtiment à énergie positive. Pour y parvenir, deux stratégies complémentaires doivent être mises en place :

- La première consiste à réduire drastiquement les déperditions thermiques grâce à :
 - une **isolation** plus importante (standard passif) que l'obligation réglementaire des parois extérieures (murs, toitures, planchers et vitrages),
 - une conception **compacte** qui limite les parois donnant sur l'extérieur pour un volume occupé donné et limite les ponts thermiques (discontinuités ou points singuliers de l'isolation, sources de déperditions supplémentaires),
 - une analyse poussée et un traitement rigoureux de chacun des **ponts thermiques** inévitables,
 - une forte **étanchéité à l'air** de l'enveloppe et une **ventilation double-flux** à haut rendement (qui récupère une grande partie de la chaleur de l'air extrait).
- La seconde consiste à valoriser les **apports solaires** pour couvrir les besoins résiduels de chauffage grâce à une optimisation des surfaces vitrées (dimensions¹⁰ et orientation), mais aussi de **l'inertie** afin de stocker la chaleur et de la restituer en cas d'absence d'ensoleillement.

Sources des déperditions

L'analyse des déperditions de l'enveloppe (hors infiltrations et ventilation) montre que plus de la moitié des déperditions proviennent des fenêtres (56%). Bien qu'étant réalisées en triple vitrage sur LowCal, ces parois restent équivalentes à seulement 4 cm d'isolant et sont donc le point faible en termes de déperditions. Cet aspect justifie largement le recours au triple vitrage pour ce bâtiment.

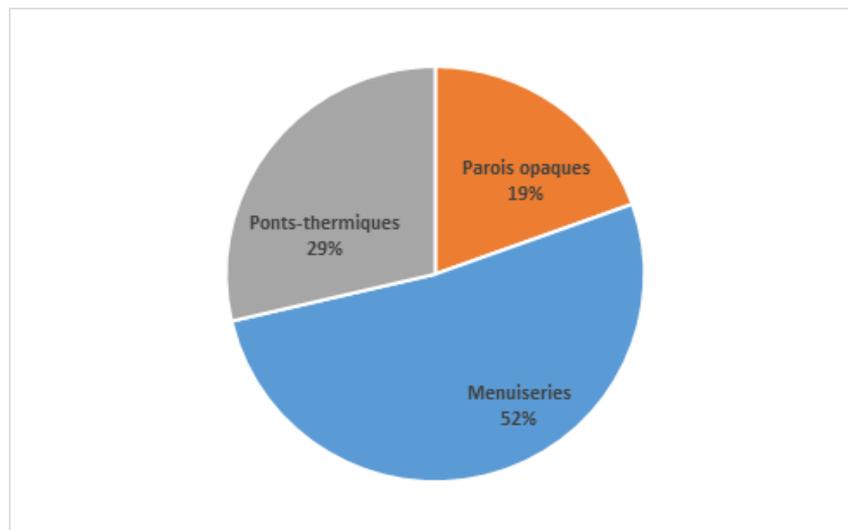


Figure 2.2.1.a du rapport T1-3 : Répartition des déperditions par les parois.

On observe par ailleurs, qu'un peu plus de la moitié des déperditions restantes sont dues aux ponts thermiques, à part quasiment égale avec les parois opaques. Cette répartition est classique pour un

⁹ Hors process spécifique dans bâtiments de bureaux (salle serveur par exemple).

¹⁰ Forcément issue d'un compromis entre thermique d'hiver et d'été, éclairage naturel et confort visuel.

bâtiment dont les parois opaques sont très isolées, et elle justifie le traitement minutieux des ponts thermiques et la recherche de compacité.

Si on élargit le calcul des déperditions à la ventilation et aux infiltrations, le bilan est le suivant :

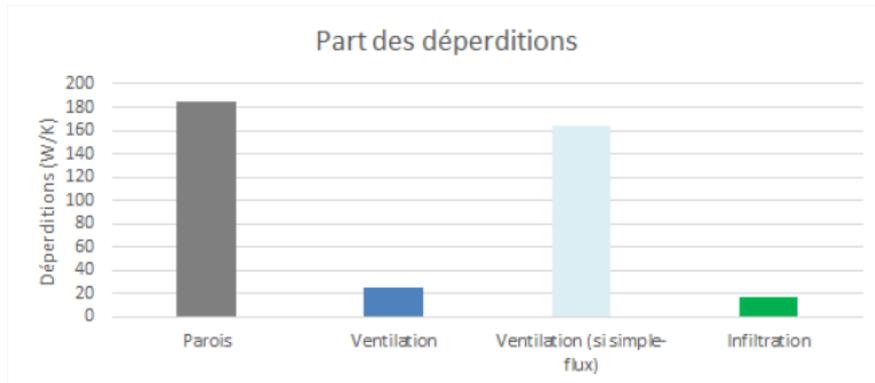


Figure 2.2.1.b du rapport T1-3 : Part des différentes sources de déperditions (en bleu ciel valeur théorique si la ventilation était simple flux. Le projet est en double flux, c'est le barreau bleu qui représente la déperdition réelle).

On voit ici l'importance de la ventilation double flux pour réduire la charge thermique du renouvellement d'air sans dégrader la qualité d'air intérieure (voir à ce sujet le rapport [T2-2]), ainsi que l'importance de la maîtrise des infiltrations : ici le niveau d'étanchéité à l'air atteint est d'environ $n_{50} = 0,6$ vol/h sous 50 Pa, soit $Q_4 = 0,19$ m³/h par m² de surface déperditif hors plancher bas sous 4 Pa, voir [T1-1 / Annexe C].

Notre chauffage : nos fenêtres, nos ordis et les occupants !

Les vitrages n'ont évidemment pas qu'un rôle déperditif, mais représentent au contraire notre principale source de chauffage (et d'apport de lumière, voir aussi l'étude du confort visuel [T2-3]).

Pour capter au mieux les apports solaires, il a été retenu un taux de vitrage global de 17% par rapport à la surface utile (surface vitrée sur surface utile). Plus précisément, par façade le taux de vitrage est respectivement de (surface vitrée sur surface de façade) :

- 40% au Sud
- 30 % à l'Est et à l'Ouest
- 15% au nord.

Il est important de préciser également que le triple vitrage retenu est à haut facteur solaire ($g=59\%$, quasiment aussi bon qu'un double vitrage).

Grâce à cette conception, le bâtiment est quasiment exclusivement chauffé par les apports solaires et les apports internes (chaleur dégagée par les occupants et les appareils)¹¹. Pendant les périodes les plus froides, il a tout de même été nécessaire de chauffer légèrement le bâtiment. Légèrement car ce chauffage est assuré par seulement 4 convecteurs électriques installés dans le hall d'entrée (moins de 6 W/m²_{SU} sur l'ensemble du bâtiment, bien inférieur au ratio de 10 W/m²_{SDP} du PassivHaus) qui fonctionnent moins de 4 mois dans l'année, pour une durée de fonctionnement équivalente à pleine puissance de seulement 23 jours, et consomment au total 3,3 kWh_{élec}/m²_{SU}/an (voir Campagne de Mesures, [T1-2 / §4.1.2]). Pour donner un ordre d'idée, cela représente une consommation de chauffage

¹¹ Notre bâtiment est situé dans la Drôme à 240m d'altitude, les hivers peuvent y être rudes mais relativement ensoleillés. Transposé à d'autres climat, ces résultats ne sont pas fondamentalement remis en cause [5.2 / 2.2.3].

5 fois moindre que ce qu'exige un bâtiment passif (15 kW.h/m²_{SDP} de besoin de chauffage) et environ 10 fois moins s'il s'agit de bâtiments neufs RT2012. C'est de ce faible besoin de chauffage que le LowCal tire une partie de l'origine de son nom : *Low Calories*, peu de calories.

Par ailleurs, même sur cette période de chauffe de 3 mois (graphique de gauche ci-dessous), les résultats montrent que la part du chauffage solaire est de 50%. Ramené à l'ensemble de la période hivernale, de début novembre à fin mars (graphique de droite), **le bâtiment est chauffé à 61% par le soleil** [T1-3 / §2.2.2].

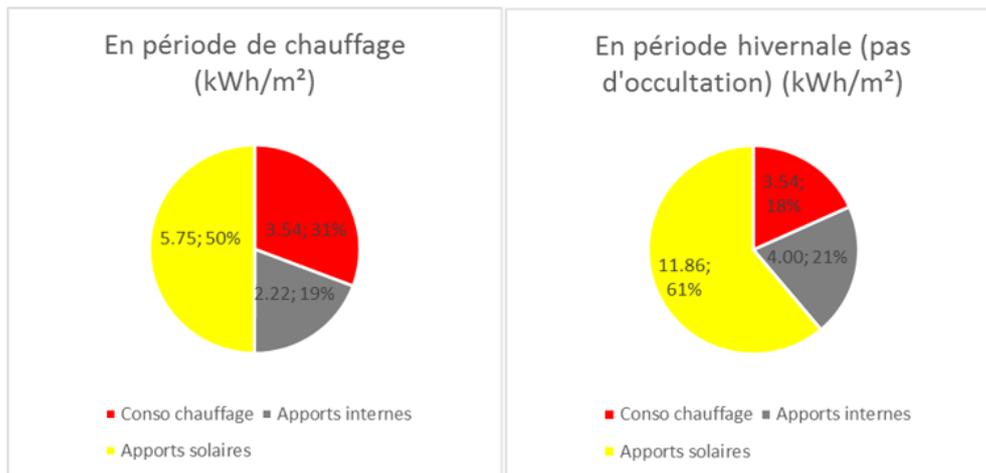


Figure 2.2.2 du rapport T1-3 : Sources de chauffage du LowCal, sur la période de chauffe et sur la totalité de la période hivernale.

De l'inertie pour la gestion de l'intermittence

La présence **d'inertie** dans le bâtiment est indispensable pour faire face à des périodes de manque d'ensoleillement. Pour cela, les planchers à structure bois sont remplis de terre crue (70 tonnes au total) et les refends intérieurs sont constitués de parements en brique de terre crue (35 tonnes)¹², aboutissant à une masse totale de 120 kg de terre par mètre carré de plancher¹³ ! Cette inertie permet de ralentir les fluctuations internes de températures et donc de maintenir une température intérieure stable.

Avant l'efficacité, n'oublions pas la sobriété

Le concept d'efficacité a fait ses preuves pour minimiser les besoins de chauffage, mais n'oublions pas que **la sobriété**, en définissant une consigne raisonnable et en adaptant sa vêtue, lui est complémentaire et souhaitable pour éviter de dégrader ces performances. Il est important de souligner que si dans un bâtiment non isolé, un degré d'écart de consigne conduit généralement à une augmentation de la consommation de chauffage de +8% environ, pour un bâtiment isolé au niveau Passif l'impact d'un degré de plus est généralement de l'ordre de +25%.

De façon générale, **la sobriété d'usage est au cœur de la performance et du confort** du bâtiment LowCal, confortant le dicton « il faut être actif dans un bâtiment passif », a fortiori dans une démarche low-tech. Cette démarche de sobriété et de low-tech permet in fine à la fois la réduction des impacts environnementaux du bâtiment et la réduction des coûts de construction et de fonctionnement.

¹² Une analyse plus détaillée de la contribution de l'inertie selon la période de sollicitation est disponible en [T1-3 / §2.2.1.c].

¹³ Hors niveau semi-enterré.

4 Un bâtiment qui reste frais

Nous avons vu précédemment que le LowCal avait un très faible besoin de chauffage grâce à son fort niveau d'isolation et son ouverture au soleil. Une crainte largement partagée consiste à penser qu'un tel bâtiment se transformera en étuve en été. Pourtant, **la température intérieure du LowCal n'a jamais dépassé les 28°C, alors même que la température extérieure a dépassé les 36°C** lors des dernières canicules (voir l'analyse du confort thermique par la mesure, [T2-1 / §3.4.2]).

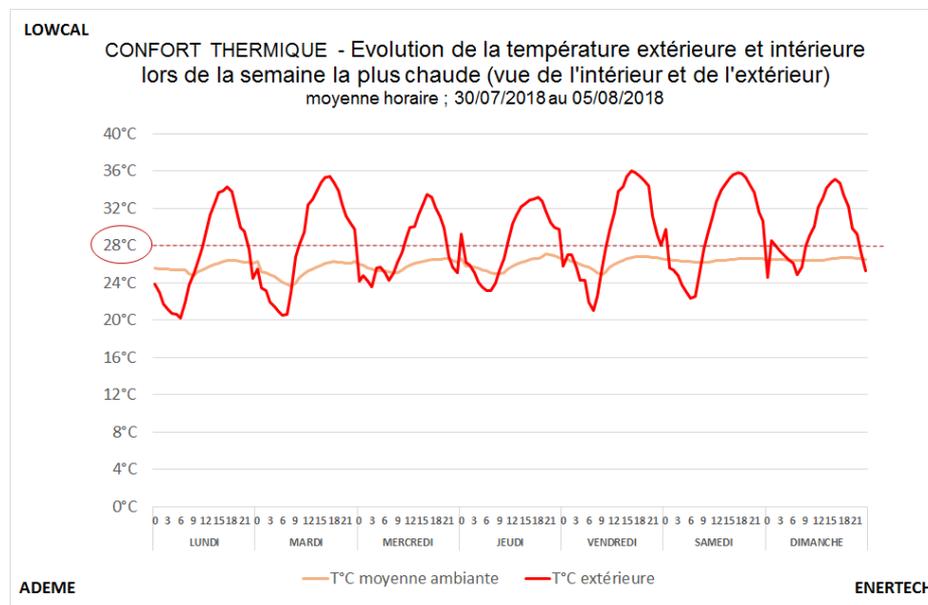


Figure 22 du rapport T2-1 : Evolution des températures extérieure et intérieure moyennes.

Pour mémoire LowCal est situé dans la Drôme avec un climat « continental méditerranéen », et à une altitude de 240m. Des travaux pour tester par STD le comportement du bâtiment sous d'autres climats ont été menés dans la tâche 5.2 de « généralisation », voir [T5.2].

Cette performance s'explique par la mise en œuvre de 3 stratégies :

- (1) Utilisation **d'occultations extérieures**¹⁴ pour se protéger des apports solaires, première cause de surchauffe.
- (2) **Minimisation des apports internes** grâce à une maîtrise poussée de la consommation des appareils électriques (choix d'appareils économes et extinction totale hors utilisation).
- (3) Evacuation de la chaleur accumulée la journée par **aération nocturne et matinale**, et stockage de la fraîcheur nocturne grâce à **l'inertie** pour en limiter les surchauffes.

Les sources de surchauffes

Nous avons pu estimer les **apports solaires** à 9,2 kWh/m²/an sur la saison estivale, grâce aux occultations qui n'enlèvent pas moins de 7,1 kWh/m²/an [T1-3 / §2.2.3]. Ces résultats nous ont permis de mettre en

¹⁴ Il s'agit de brise-soleils orientables (BSO) pour les baies vitrées Sud, et de volets battants ou coulissants, pour les autres baies vitrées (voir description du bâtiment [T1-1] et étude du confort visuel [T2-3]). Il est nécessaire que ces occultations soient extérieures et non intérieures car, autrement, une grande partie de la chaleur reste bloquée par le vitrage, à l'intérieur (effet de serre).

évidence que, bien que le flux direct fût la plupart du temps arrêté, une bonne partie des apports provenait du **flux diffus** issu du ciel ou des réflexions du sol (par exemple une fenêtre Nord peut recevoir en été jusqu'à 130 W/m² uniquement de diffus). Une piste d'amélioration du confort d'été, notamment en période critique, pourrait donc être **d'occulter totalement** les vitrages des bureaux inoccupés (**y compris au Nord**) et de ne laisser pénétrer, dans les autres pièces, que la luminosité nécessaire.

Les apports internes, y compris la chaleur dégagée par les occupants, ont été estimés à 3,2 kWh/m²/an.

A la différence de la gestion en hiver, quand il suffit de se protéger de l'extérieur (du froid), la gestion d'été nécessite de combattre les conditions extérieures (températures et apports solaires, directs et indirects) et les conditions intérieures (apports internes électriques et humains), d'où la nécessité de les minimiser à la source.

Atténuation des surchauffes et sources de fraîcheur

L'impact de ces apports internes peut être atténué par l'**inertie « superficielle », dite journalière**. En effet, plus il y a d'inertie, plus il faut d'énergie pour élever la température des parois d'un degré. A apport d'énergie constant, l'élévation de température est donc moindre lorsque l'inertie est plus importante.

Enfin, nos estimations ont montré que ces deux sources d'apports de chaleur (solaires et internes) étaient compensées par la fraîcheur apportée par l'aération nocturne [T1-3 / §2.2.2 et 2.2.3]. Cette aération est indispensable pour éviter la surchauffe du bâtiment jour après jour. Celle-ci a évidemment des limites en période caniculaire car elle ne peut, qu'au mieux, faire tendre la température du bâtiment vers la température nocturne et non en deçà.

L'inertie face à la canicule de longue durée

Pour pallier cette limitation, il convient de miser sur de l'**inertie « profonde », dite séquentielle**. Cette inertie permet de stocker dans le cœur des matériaux suffisamment épais les températures passées du bâtiment et donc de limiter l'élévation de température sur plusieurs jours. Nous avons pu déterminer que **la constante de temps de réchauffement du bâtiment était de l'ordre de 10 jours** [T5.2 / §2.3.1]. C'est-à-dire que le bâtiment est capable de limiter sensiblement son échauffement face à une vague de chaleur si celle-ci dure moins de 10 jours. Au-delà, il ne pourra plus bénéficier de la fraîcheur stockée en profondeur, le stock ayant été quasiment épuisé.

Pour augmenter cette constante de temps il conviendrait d'augmenter l'inertie profonde, en ajoutant des cloisons lourdes par exemple. Notons que contrairement aux idées reçues, il est préférable que le bâtiment soit isolé pour faire face aux vagues de chaleur (à condition de se protéger des apports solaires !). En effet, ainsi, la masse thermique se décharge bien plus lentement car la chaleur ne pénètre quasiment pas via l'enveloppe isolée¹⁵ (apports estimés à moins de 1 kWh/m²/an [T1-3 / §2.2.2]). Un bâtiment moins isolé se déchargerait notablement plus vite, voir la comparaison avec la variante fictive RT2012 [T3 et 4 / §2.3].

¹⁵ Notons par ailleurs que l'isolation par l'extérieur permet d'augmenter l'inertie mobilisable à l'intérieur car le mur ainsi isolé est protégé de l'extérieur et sa masse thermique contribue ainsi quasi intégralement à l'intérieur.

Trop d'inertie ?

On craint parfois qu'il y ait trop d'inertie dans un bâtiment et qu'il conserve la chaleur d'une journée à l'autre en étant trop difficile à refroidir. Cela peut effectivement se produire si l'aération nocturne est insuffisante (impossibilité d'ouvrir les fenêtres ou absence de système de sur-ventilation). En quel cas, il est vrai qu'un bâtiment avec moins d'inertie se rafraîchirait plus vite, mais chaufferait également plus vite en journée. Autrement dit, la question est donc de savoir s'il est préférable d'avoir un peu chaud en continu ou d'avoir très chaud ponctuellement...

Nous avons pu montrer que pour un bâtiment donné utilisant les stratégies estivales présentées précédemment, moins isolé, il s'avérait en définitive plus inconfortable [T3 et 4 / §2.3]. Par ailleurs, s'il était climatisé, son besoin frigorifique serait plus important et l'installation technique plus importante (en particulier sa puissance).

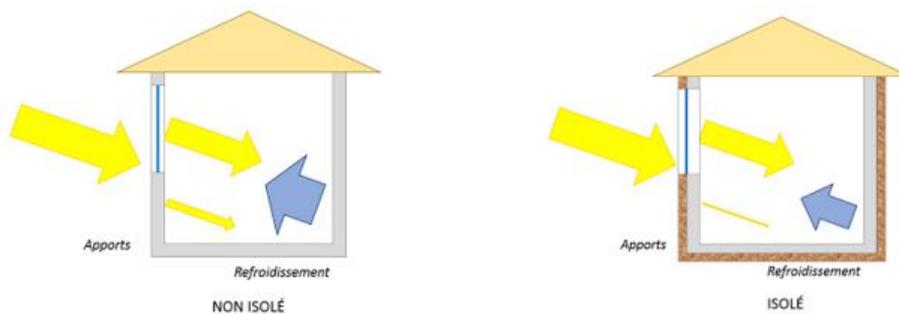


Figure 8 du rapport T3 et 4 : Comparaison schématique des besoins frigorifiques instantanés entre bâtiments isolé et non-isolé.

Quant à la chaleur qui aurait été accumulée à l'issue d'une vague de chaleur dans un bâtiment inertiel et isolé, celle-ci pourra être **rapidement et efficacement évacuée par aération**, profitant de la retombée des températures nocturnes. L'aération permet en effet d'accélérer le refroidissement grâce aux importants débits de renouvellement d'air, aux vitesses d'air importantes et aux températures potentiellement fraîches.

Isolé contre le froid ET le chaud

Ainsi, LowCal parvient à minimiser à la fois ses besoins de chauffage et ses besoins de froid, à condition d'utiliser comme il se doit les **stratégies estivales d'occultation et d'aération nocturne**.

Sous cette condition, les variantes testées dans la tâche 5.2 de Généralisation du concept LowCal ont montré qu'**encore plus d'isolation et encore plus d'inertie** auraient rendu le bâtiment à la fois **moins consommateur** de chauffage et **plus confortable** en été, et ce pour les différents climats testés. Pour plus de détails voir [T5.2 / §3].

5 Un bâtiment aux consommations électriques maîtrisées

La maîtrise des consommations électriques est essentielle pour le confort d'été, comme vu précédemment, mais aussi pour atteindre un bilan positif en énergie et énergie grise.

Nous aborderons ici les résultats de la Campagne de mesure (voir [T1.2]) sur les différents postes de consommation, dont l'importance relative est illustrée par le graphique ci-dessous :

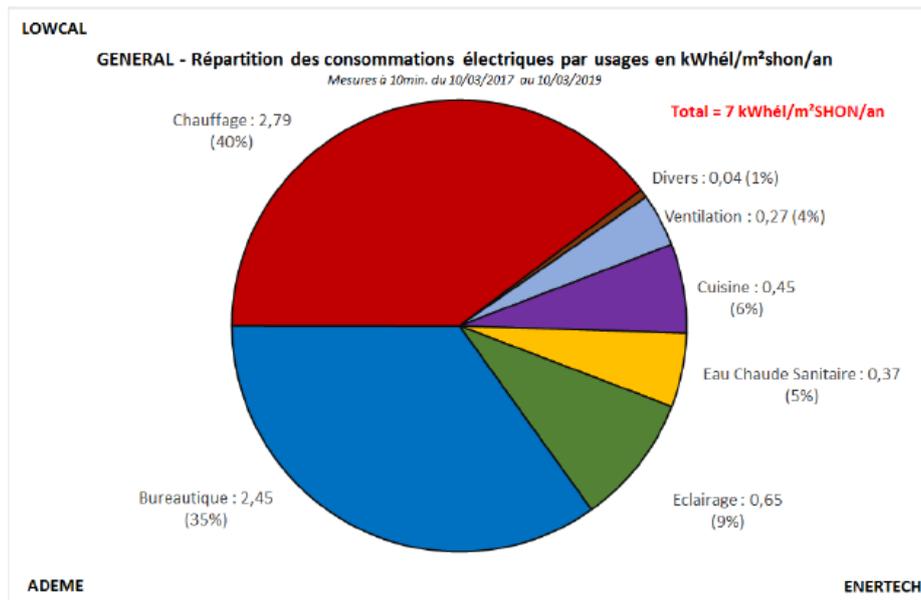


Figure 8 du rapport T1-2 : Répartition des consommations électriques mesurées par usage (LowCal, mars 2017 – mars 2019).

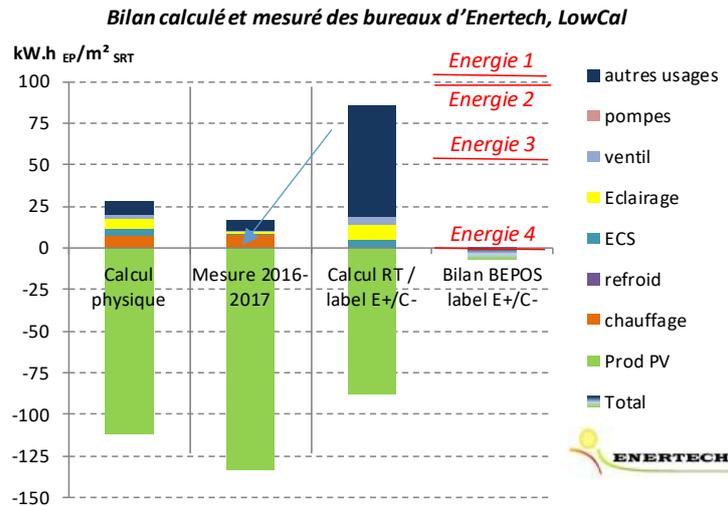
Minimisation des consommations liées au chauffage

Nous avons vu comment la conception avait permis de réduire très fortement la consommation de chauffage et donc les consommations énergétiques associées. Les besoins de chauffage sont si faibles, qu'il était envisageable de **simplifier drastiquement le système de chauffage**. Le chauffage est en effet assuré par de simples convecteurs électriques. L'utilisation d'une pompe à chaleur ou d'un poêle à bois pourrait réduire encore cette consommation d'énergie, mais aurait une répercussion défavorable en matière de coût (investissement et entretien) et d'impact environnemental (notamment énergie grise et bilan carbone).

Minimisation des consommations de la bureautique

Deuxième poste de consommation du LowCal, le niveau de **consommation de la bureautique** s'avère être particulièrement faible (2 fois moins que les meilleures performances mesurées lors de nos campagnes de mesures et plus de 10 fois moins que les plus mauvaises) [T1-2 / §4.3].

Il est également intéressant de noter que le ratio de consommation mesuré, de 2,45 kWh_{élec}/m²SHON/an est environ **10 fois inférieur à la valeur de consommations des « Autres usages » du label E+C-**, dits Aue, et fixés forfaitairement à 26 kWh_{élec}/m²SHON/an. Ceci est la principale explication au fait que notre bâtiment à énergie positive d'un facteur 6 en réalité, n'est que tout juste à énergie positive (niveau E4) dans le calcul E+C-, comme l'illustre le graphique suivant :



Comparaison des consommations en énergie primaire (conventionnelle) par calcul physique, mesurées sur la première année de mesure, et dans le calcul du label E+C- (graphique présenté à EnerJmeeting en février 2017).

Ces résultats s’expliquent par une certaine sobriété dans l’usage (notamment l’extinction des veilles de l’ensemble de la bureautique) mais aussi dans le choix et la gestion du matériel informatique (utilisation de portables et écrans secondaires de diagonale raisonnable, etc.). **Il s’agit ici de mesures qui ne coûtent rien et qui permettent d’économiser beaucoup !**



Exemple d’ordinateur portable de diagonale raisonnable (puissance < 25W)



Interrupteur général pour la coupure des veilles la nuit et le WE

Minimisation des consommations d’éclairage

De même que pour la bureautique, la **consommation liée à l’éclairage** est bien inférieure aux standards (7 fois plus faible que les meilleures performances mesurées lors de nos campagnes de mesures et jusqu’à 43 fois moins que les pires) [T1-2 / §4.4]. Ce niveau a notamment pu être atteint grâce à une optimisation des sources lumineuses (faible consommation, niveau d’éclairage ajusté), à l’éclairage naturel important et la très bonne gestion de l’intermittence.

A ce sujet voir également l’analyse du confort visuel [T2-3].

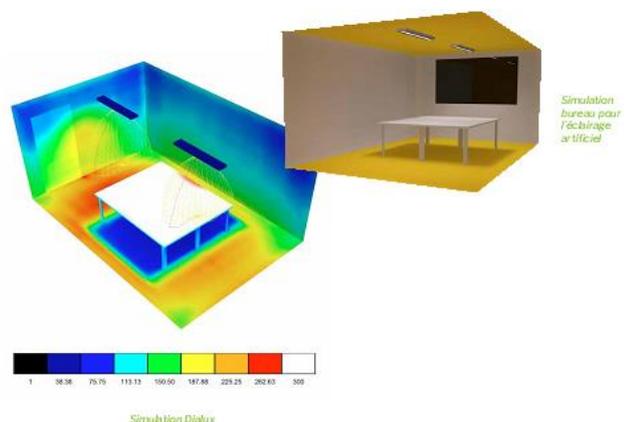


Illustration de l’optimisation de l’éclairage artificiel par calcul Dialux.

Minimisation des consommations de la ventilation

La réduction des consommations est encore plus importante pour la **ventilation double flux décentralisée**. En effet, la consommation de celle-ci est 12 fois moindre que les meilleures performances mesurées lors de nos campagnes de mesures et jusqu'à 110 fois plus faible pour les bâtiments aux performances les plus mauvaises [T1-2 / §4.7]. Ce résultat exceptionnel s'explique par une maîtrise du nombre d'heures de fonctionnement (extinction systématique en inoccupation), une adaptation des pièces ventilées à l'occupation, ainsi qu'une puissance spécifique (puissance électrique nécessaire à la ventilation d'un certain débit) très basse du fait de l'absence de réseau de distribution, la ventilation étant de type décentralisée (les ventilateurs consomment individuellement 5W en moyenne en fonctionnement).



Caisson de ventilation décentralisé avant pose.

En pointillés, le conduit double flux traversant le mur.

Figure 36 du rapport T1-2 : Illustration du système de ventilation double flux décentralisé par pièce.

Il est important de préciser que ce résultat n'est pas obtenu au détriment de la qualité d'air intérieure. Les mesures réalisées par Médiéco [T2-2] ont montré que la QAI est bonne sur l'ensemble des critères.

Minimisation des autres usages

Une même approche (minimisation des besoins, choix de matériels performants et ajustement à l'usage) a permis de limiter fortement la consommation des autres postes.

A noter en particulier un travail sur la **génération d'ECS pour la douche** : nous avons démontré d'une part l'intérêt d'utiliser une jaquette en surisolation du ballon d'eau chaude, et avons testé un prototype de production d'ECS instantanée pour la douche avec récupération de chaleur sur eau grise, qui s'avèrera très intéressant après résolutions de quelques problèmes constatés [T1-2 / §4.5 et annexes 1 et 2]. L'ECS représente $0,37 \text{ kWh}_{\text{élec}}/\text{m}^2_{\text{SHON}}/\text{an}$.

Les consommations de la **cuisine-réfectoire** ont également été suivies. Elles représentent $0,45 \text{ kWh}_{\text{élec}}/\text{m}^2_{\text{SHON}}/\text{an}$.

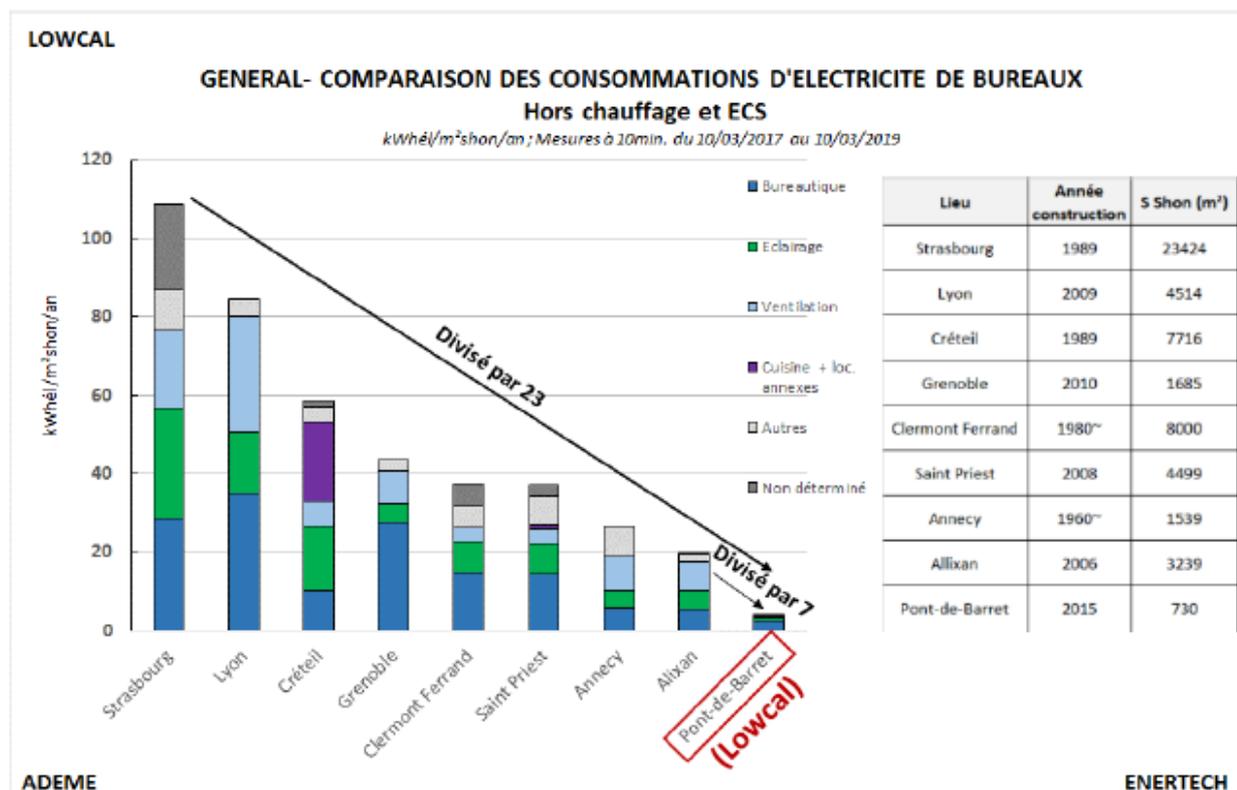


Figure 16 du rapport T1-2 : Comparaison des consommations d’électricité spécifique mesurées dans quelques bâtiments de bureaux.

Conclusion

Les résultats sont sans appel. Cette réduction de la consommation de tous les usages est essentielle pour atteindre un niveau d’énergie grise positive, afin de maximiser le surplus de production électrique.

Insistons encore une fois sur **l’importance de la sobriété** (questionnement de ses besoins), qui apporte des réponses à la fois plus simples (low-tech) et moins coûteuses que de ne raisonner que par l’efficacité énergétique (systèmes performants sans questionner l’usage).

6 Un bâtiment sain et confortable

Nous avons passé en revue les performances techniques et énergétiques du LowCal. Il est évident que la conception d'un bâtiment ne doit pas s'arrêter à ces critères, mais inclure **également le bien-être et la santé de ses occupants**.

Une bonne qualité d'air intérieur

La **qualité de l'air intérieur (QAI)** est un enjeu de plus en plus important car nous passons de plus en plus de temps à l'intérieur. Or, ces espaces peuvent être source de nombreuses pollutions, émises notamment par les occupants, mais aussi par les produits de construction. Le renouvellement d'air, via la ventilation principalement, sert justement à évacuer les polluants intérieurs (notamment la première année d'exploitation après construction).

Une campagne de mesures réalisée par Médiéco sur LowCal a démontré que la ventilation était suffisante pour maintenir une **teneur en CO₂** (issue de la respiration des occupants) en deçà des seuils les plus hauts la grande majeure partie du temps [T2-2]. Cette mesure réalisée de mai à juillet 2017 a été prolongée dans le cadre de notre campagne de mesures de mars 2017 à février 2018 [T2-1 / §4.2.3] :

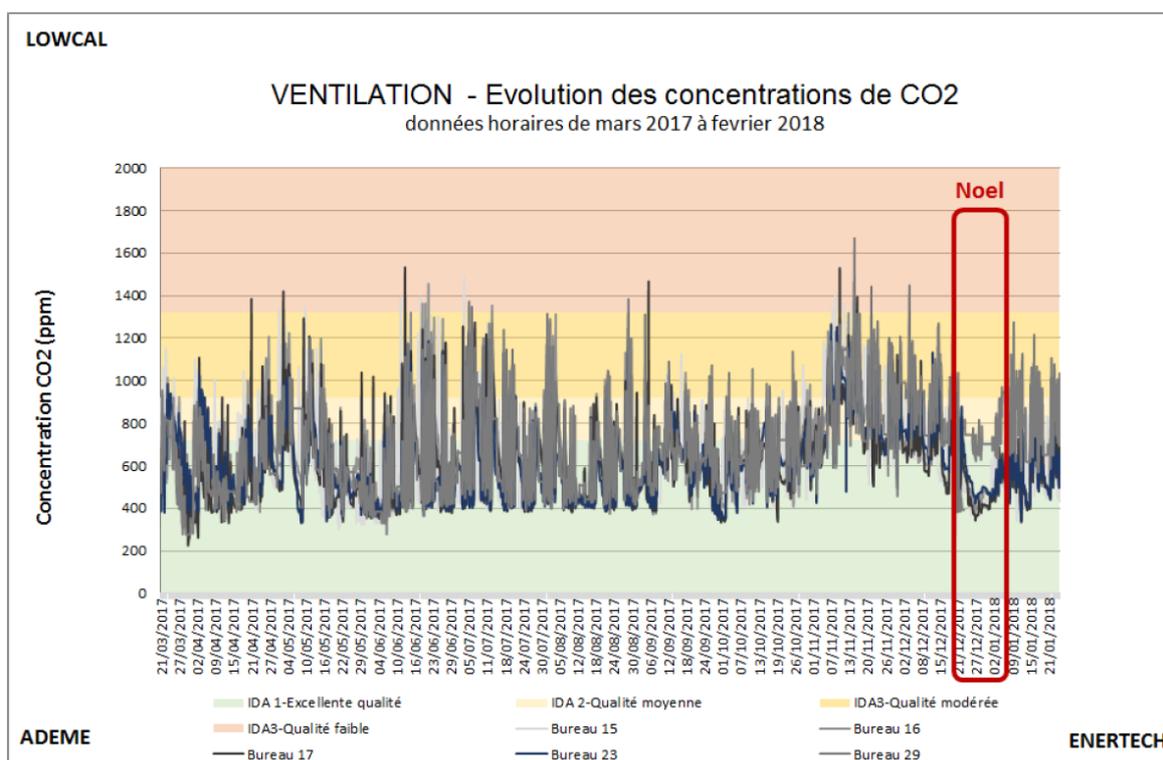
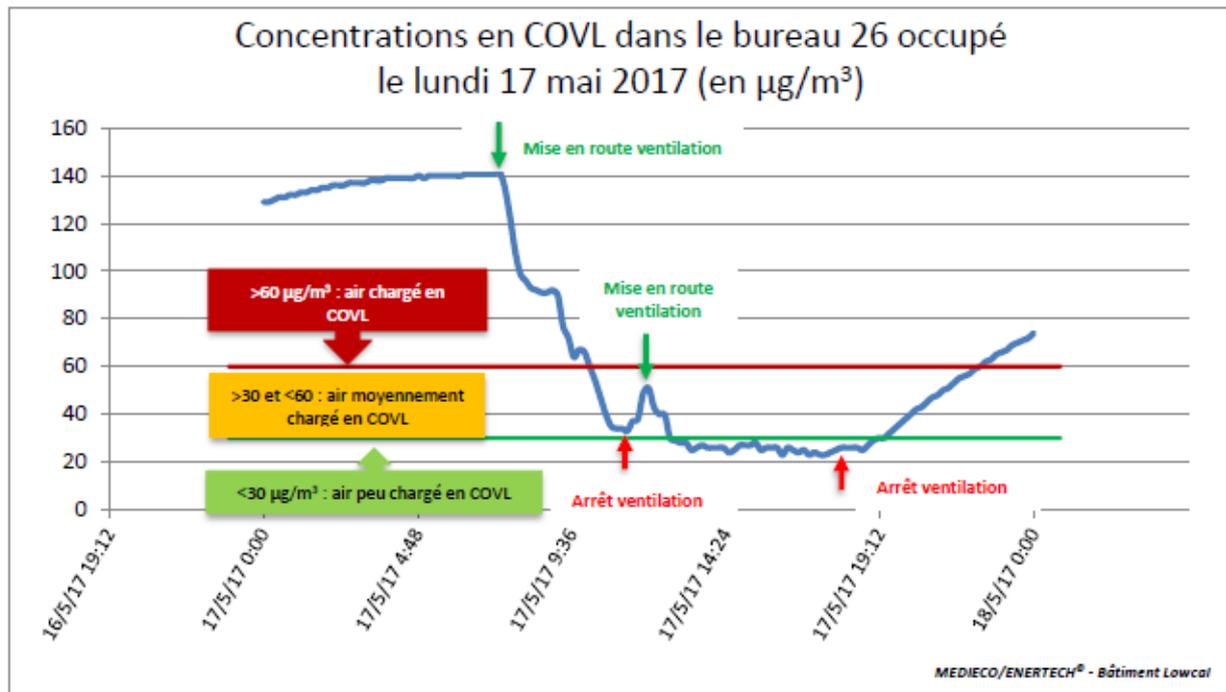


Figure 87 du rapport T2-1 : Evolution temporelle des concentrations en CO₂ sur 1 an.

On note que le seuil de 1300 ppm défini par le Règlement Sanitaire Départemental Type (RSDT) n'est dépassé que très ponctuellement. La plupart du temps la concentration est même inférieure à 900 ppm.

Sur les autres indicateurs de QAI, notamment les **composés organiques volatils (COV)**, le choix des matériaux retenus, faiblement transformés et contenant le moins possible de matières synthétiques,

contribuent nettement à limiter la pollution intérieure. Toutefois, le bois brut émet naturellement des composés organiques volatils. La ventilation est donc indispensable pour évacuer ces polluants, et les mesures ont montré que le niveau de ventilation était suffisant en occupation, mais que l'arrêt de la ventilation hors occupation faisait augmenter les concentrations de polluants [T2-2 / §3.2 et suivants].



Graphique 11 du rapport T2-2 : Zoom sur l'efficacité de la ventilation pour abaisser les concentrations en COVL dans le bureau occupé 26 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ce constat nous rappelle que **le choix de matériaux naturels ne suffit pas à assurer une bonne qualité d'air. Une ventilation contrôlée reste nécessaire** pour évacuer les polluants résiduels.

En pratique, l'analyse de Médiéco nous a amené à **revoir nos pratiques d'usages des bureaux**, d'une part en laissant allumés les caissons de ventilation des bureaux le soir, afin que le premier arrivant le lendemain puisse les allumer tous avec l'interrupteur général à son arrivée, faisant ainsi rapidement chuter la concentration de COV. De plus, il est recommandé au premier arrivant d'aérer 15' environ par ouverture des fenêtres, et ce même en période de chauffe (l'impact d'une ouverture de courte durée étant faible sur le besoin de chauffage).

Pour un bâtiment (un peu) moins low-tech, un simple système d'horloge peut permettre de remettre en route la ventilation mécanique double flux 1 heure environ avant l'arrivée des utilisateurs.

Confort hygro-thermique

Côté confort thermique ressenti en été et en hiver, un questionnaire réalisé en interne a montré que **90% des occupants trouvaient la température intérieure acceptable voire très acceptable** [T2-1 / §3.6]. Ce qui est tout à fait en cohérence avec les mesures relevées [T2-1 / §3]. Les rares inconforts mesurés ont pu être observés principalement en matinée, que ce soit en été ou en hiver, période où le bâtiment est le plus froid (à cause de l'aération nocturne et des déperditions maximales sur cette période).

Notons que **les parois en terre crue contribuent nettement à améliorer le confort hygro-thermique** en stabilisant nettement l'hygrométrie intérieure entre 50 et 60% en moyenne. Elle apporte ainsi une « inertie hygrothermique » journalière. Cependant nous avons pu montrer que, contrairement à ce qui

est parfois affirmé, il n’y a pas d’effet notable d’inertie hygrothermique inter-saisonnière, les quantités d’énergie en jeu étant trop faibles, et la dynamique de stockage/déstockage étant plutôt contraire à celle qui aurait été souhaitable. Voir à ce sujet l’étude détaillée de la contribution de la terre crue au confort hygrothermique au [T1-3 / § 2.1.4].

Confort visuel

Le confort est aussi visuel. Un questionnaire a révélé que **les occupants appréciaient leur cadre de travail principalement grâce à l’éclairage naturel**, bien avant le confort thermique [T2-3 / §2]. L’ambiance lumineuse y est d’ailleurs ressentie comme confortable par plus de 75% des occupants. Le sentiment de bien-être est favorisé par les vues dégagées sur l’extérieur.



Graphique page 7 du rapport T2-3 : Simulations des Facteurs De Lumières du Jour sur les bureaux de LowCal avec Dialux EVO (plan du RDC).

Les mesures ont confirmé les calculs et montré que le **facteur de lumière du jour (FLJ) atteignait environ 3%** en moyenne sur les postes de travail, ce qui est un niveau tout à fait appréciable [T2-3 / §3.2]. Des améliorations ponctuelles sur l’emplacement des postes de travail ont été apportées. **L’autonomie mesurée en éclairage naturel est de l’ordre de 70%** [T2-3 / §4.5] ce qui est également très élevé.

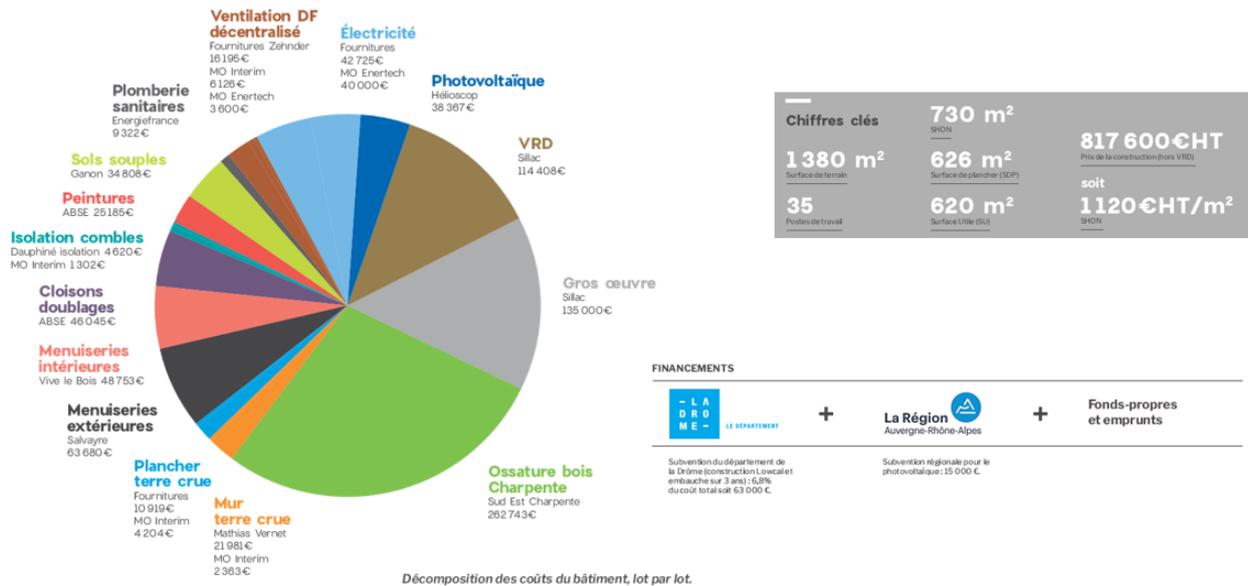
Performance, santé et confort sont compatibles

Le LowCal a ainsi pu démontrer qu’une approche globale et systémique peut atteindre des **niveaux de confort et de performance très élevés sur un large panel de critères**.

Les clés de ce résultat restent le choix de **matériaux sains**, mais aussi celui d’une **ventilation mécanique double flux** qui assure à la fois la qualité d’air intérieure tout en contribuant au confort thermique d’été comme d’hiver, ainsi que l’**optimisation multicritère des surfaces vitrées**, de leur orientation et de leur occultation (entre confort visuel, apports solaires et confort d’été), et enfin l’**inertie** qui reste incontournable, la terre crue ajoutant une dimension d’inertie hygrothermique qui contribue également au confort.

7 Un bâtiment économique et reproductible

Au-delà de la recherche d'un bâtiment démonstrateur sur le plan énergétique et environnemental, le bâtiment LowCal se veut également un **bâtiment reproductible**. Les choix opérés en conception ont aussi permis de maîtriser l'enveloppe budgétaire fixée. En effet, **le coût constaté de la construction du bâtiment s'est établi à 1 120 € HT/m²_{SHON} (hors VRD)**, ce qui est un coût très faible même pour un bâtiment de bureaux simplement RT2012 et même pour la Drôme (où les coûts de construction sont environ 20 à 30% moins chers que dans les grandes métropoles).



Détail des coûts issu de la plaquette de présentation du LowCal, rapport T1-1 annexe 1.

Surinvestissement et coût global comparé à une référence RT2012

Comparé à un bâtiment plus conventionnel et en intégrant tous les postes de dépenses, y compris la conception, on peut estimer un surcoût d'investissement d'environ 17% pour le LowCal [T3 et 4 / §5.1.2.3], la variante fictive RT2012 en béton étant estimée à 960 € HT/m²_{SHON} (coût de construction hors VRD). En effet notre variante fictive bénéficie de l'excellente **compacité** du LowCal, de sa bonne **orientation**, ainsi que de sa relative **sobriété architecturale, qui s'avèrent donc être les principaux leviers du faible coût du LowCal**. De plus, l'analyse des écarts montre que **l'absence d'un système de chauffage** et de climatisation représente une économie de 75 € HT/m²_{SHON} pour le LowCal (hypothèse d'un système DRV pour la variante fictive), tandis que l'installation photovoltaïque ajoute un surinvestissement (rentable en soi) de 53 € HT/m²_{SHON}.

En coût global sur 50 ans, le surinvestissement dans la performance thermique, environnementale, et dans la production d'énergie renouvelable est **largement compensé par les économies réalisées**, sur la consommation d'énergie, la maintenance, et par la vente d'électricité produite. Ce gain oscille entre 15 et 45% du coût global sur 50 ans par rapport à un bâtiment classique, toujours en faveur du LowCal, quelles que soient les hypothèses retenues concernant le taux d'actualisation et l'évolution des prix de l'énergie dans le futur [T3 et 4 / §5.1.3.3].

La pertinence économique de ce bâtiment est la résultante de tous les choix de conception : bioclimatisme, enveloppe Passive, faibles consommations électriques, compacité, sobriété, efficacité, etc.

Reproductibilité du concept LowCal

Les performances énergétique et environnementales du LowCal couplées à un coût de construction très attractif nous invitent à réfléchir à la réplication du concept.

D'une part nous avons **tiré les enseignements de quelques défauts du LowCal**, concernant notamment l'acoustique intérieure. Des solutions sont envisagées pour assurer à la fois l'apport d'inertie et une meilleure atténuation entre étages, tout en limitant l'énergie grise et l'impact climatique de la construction. Nous analysons également les **contraintes croisées** que nous avons rencontrées lors de la conception, notamment le contreventement avec une façade Sud assez vitrée et en présence de masses dans les planchers qui sont sollicitées en cas de séisme. Voir le rapport Contraintes techniques [T5-1].

L'étude du **même bâtiment de bureaux dans d'autres climats** [T5-2 / §2.2] a permis de montrer la robustesse du confort d'été, même face au réchauffement climatique. En revanche le concept de bâtiment sans chauffage ne semble pas généralisable à toutes les régions de France si on met la barre à 5 kW.h/m² de besoin de chauffage, mais peut être adapté en chauffage low-tech (un simple poêle à bois central ? etc.), sachant que le critère de conception Passif d'un besoin inférieur à 15 kW.h/m² reste largement respecté.

L'étude d'une **variante résidentielle** [T5-2 / §2.1] a montré qu'il était possible d'atteindre des besoins de chauffage comparables en logement, mais avec une forte variabilité liée à l'usage (nous avons simulé la propagation d'incertitude avec le logiciel AMAPOLA). Cela dit la principale limite à un bâtiment de logement sans chauffage est plus conditionnée par l'acceptabilité par les occupants, habitués à un moyen de chauffage bien identifié, que par des considérations techniques. L'étude conforte l'intérêt de la démarche de conception Passive, encore renforcée dans le concept LowCal, et qui rend possible la mise en œuvre de solutions de chauffage low-tech et peu coûteuses. Le confort d'été n'a pas pu être étudié mais des abaques [T5-2 / §2.2.3] permettent d'extrapoler les résultats de confort d'été des bureaux.

En tout état de cause le confort d'été et l'optimisation des surfaces vitrées d'un bâtiment aussi sensible (voir [T5-2 / §3.3]) doit faire l'objet d'une étude personnalisée par simulation thermique dynamique. Comme nous l'avons vécu en cours de conception, **un bâtiment sans chauffage n'est pas un bâtiment sans bureau d'étude...**

Et la suite ?

Au-delà de ces cas d'étude théoriques, Enertech travaille actuellement en tant que bureau d'étude fluides sur **d'autres projets inspirés du concept LowCal** notamment les bureaux de l'Institut négaWatt, projet situé à Valence (26), ainsi qu'un bâtiment d'enseignement, ou encore un projet en résidentiel que nous accompagnons en tant qu'AMO.

*Projet de bureaux pour l'Institut négaWatt – Insertion phase PC.
Architecte Julien Martin-Sisteron.*

