

Le projet d'école du bureau Terraenergie réalisée en Alsace

*Étude de Pauline Aubry, Louise Cousseau,
Vincent Hedou et Guillaume Troussard*

Introduction

La transition écologique s'accompagne de démarches qui doivent s'appliquer dans tous les domaines, en particulier dans les secteurs ayant les plus gros impacts sur l'environnement, comme c'est le cas de celui de la construction. Les professionnels du bâtiment s'appliquent donc de plus en plus à mettre en place des projets innovants, plus respectueux pour la planète et ses habitants. Ainsi, différentes approches proposent de répondre aux défis écologiques dans le bâtiment avec par exemple les **maisons passives**, **autonomes** ou encore à **énergie positive**.

Cependant, ces démarches ne s'arrêtent pas à l'habitat comme nous allons le voir avec cet exemple de projet d'école passive, qui s'est révélé être une réussite malgré l'importance du défi. Il s'agit d'une école à énergie positive construite dans le village alsacien de Burnhaupt-le-Haut entre 2011 et 2012 et qui, par l'utilisation de techniques innovantes, produit presque autant d'énergie qu'elle n'en consomme.

Nous définirons donc dans une première partie ce que sont les bâtiments passifs et à énergie positive, puis nous présenterons dans une deuxième partie le cadre dans lequel ce projet s'est réalisé. Une troisième partie expliquera ensuite comment l'école a été conçue pour répondre aux objectifs du projet, et enfin une quatrième et dernière partie abordera le retour sur expérience après la réalisation du bâtiment.



Vue d'ensemble de l'école de Burnhaupt-le-Haut

Source : energivie.pro, 2016, *École élémentaire à énergie positive de Burnhaupt-le-Haut*, p4, disponible sur : <http://www.envirobatgrandest.fr/wp-content/uploads/ficheburnhauptlehaut-1.pdf>

I. Bâtiment à énergie positive et bâtiment passif

Dans un premier temps, nous allons présenter ce que l'on entend par « bâtiment à énergie positive ».

1. Définition du bâtiment à énergie positive

Un bâtiment dit « à énergie positive » correspond à un bâtiment qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme à l'échelle d'une année. Il s'agit en général de bâtiments passifs (voir définition paragraphe suivant), et dotés de systèmes de récupération ou de production d'énergie. Ainsi, la quantité totale d'énergie

consommée par les usagers du bâtiment ne doit pas excéder la quantité totale d'énergie récupérée ou produite par le bâtiment.

Il est important de préciser que le bâtiment à énergie positive n'est pas nécessairement un bâtiment vertueux et sobre en énergie, dans la mesure où il peut compenser ses consommations énergétiques importantes par une grande production d'énergie. Ce concept est donc toujours à mettre en regard des consommations totales réelles du bâtiment, en prenant en compte l'ensemble de son cycle de vie.

Un bâtiment dit « à énergie positive » étant souvent un bâtiment qualifié de « passif », il convient de définir également ce que l'on entend par « bâtiment passif ».

2. Définition du bâtiment passif

Un bâtiment passif correspond à un bâtiment ayant une très faible consommation énergétique, à la fois par une maîtrise importante des flux, pour limiter les pertes, et par une limitation de la consommation des appareils. Ainsi, les besoins de chauffage s'en trouvent très réduits.

Un bâtiment passif repose sur un certain nombre de principes et de techniques qui lui permettent d'acquérir ces performances énergétiques :

- une architecture bioclimatique, dans le but de récupérer un maximum d'énergie solaire ;
- une isolation et une étanchéité à l'air très performantes, pour limiter les déperditions thermiques ;
- un contrôle de la ventilation ;
- un traitement des ponts thermiques ;
- une limitation de la consommation des appareils ménagers.

Ayant défini les principes que suit ce bâtiment, nous allons maintenant présenter le projet lui-même.

II. Cadre du projet

Pour présenter le cadre du projet, nous allons dans un premier temps détailler son contexte, et ensuite les différents acteurs du projet.

1. Contexte

Afin de mieux appréhender le contexte du projet, nous présenterons d'abord les enjeux de la maîtrise d'ouvrage du projet, puis le contexte climatique et géographique dans lequel se trouve le bâtiment.

a. Commande, enjeux de la maîtrise d'ouvrage

Ce projet d'école à Burnhaupt-le-Haut a été commandé par la mairie de ce village de moins de 2000 habitants en Alsace en 2010. Cette demande a été faite pour améliorer l'accès à l'école primaire et le choix du terrain s'est donc fait naturellement pour être proche de l'école maternelle, des terrains de sport et dans un cadre de verdure.

L'objectif était de construire un bâtiment répondant aux enjeux énergétiques et écologiques pour passer à l'action après avoir réalisé un plan climat (PLU), comprenant des enjeux écologiques, en 2007. Le maître d'ouvrage a donc choisi de faire preuve d'un certain volontarisme politique en anticipant les réglementations sur les nouveaux bâtiments de la RT 2012 qui impose un certain niveau de performance énergétique (conception du bâtiment, confort et consommation d'énergie).

Plus précisément, la commande a été réalisée pour une école de 5 classes, soit 100 élèves, présentant une morphologie originale et adaptée pour une dépense énergétique maîtrisée. L'école *Les sources* a finalement été inaugurée le 20 juin 2020.

b. Situation climatique et géographique

Située en Alsace, soit une région au climat continental avec une amplitude thermique importante, cette école doit être adaptée au climat spécifique de cette région où les hivers sont froids et secs tandis que les étés

peuvent être assez chauds. En effet, dans la région de Burnhaupt-le-Haut, la moyenne des températures minimales en Janvier est de -1°C (3°C en Loire Atlantique) et celle des températures maximales en Juillet est de 26°C (25°C en Loire Atlantique) selon les données de la NOAA. Il était donc important de construire un bâtiment qui puisse être chauffé sans dépenser trop d'énergie l'hiver,

tout en faisant attention aux surchauffes l'été, quand les températures remontent.

Le terrain sur lequel l'école a été construite correspond à un espace vaste où il était possible de choisir l'emplacement du bâtiment selon l'orientation voulue et d'avoir un grand espace de récréation pour les enfants.

Pour répondre aux différents enjeux de ce projet, différents acteurs ont été mis à contribution.



Emplacement de l'école élémentaire de Burnhaupt-le-Haut, *Google Earth*

2. Les acteurs du projet

Nous allons maintenant présenter les acteurs de ce projet. Comme tout projet de construction, il convient de présenter la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre. Le maître d'ouvrage est ici la mairie de Burnhaupt-le-Haut, dont le volontarisme politique a permis le lancement et la conduite du projet. La maîtrise d'œuvre est constituée des ateliers d'architectes spécialisés dans les bâtiments passifs qui ont été impliqués dans le projet. Nous détaillerons aussi les relations entre ces différents acteurs.

a. Maîtrise d'ouvrage : la mairie de Burnhaupt-le-Haut et son volontarisme politique

Comme nous l'avons précédemment précisé, la maîtrise d'ouvrage et le commanditaire de cette école à énergie positive est la mairie de Burnhaupt-le-Haut. La mairie était notamment dirigée par Antoine Muller lors de l'appel à projet en 2010 puis par Véronique Sengler (Divers Gauche) à partir de 2014. La mairie a choisi l'emplacement de l'école mais a également retenu le projet de la maîtrise d'œuvre proposé par les ateliers D-Form.

b. Le maître d'œuvre, des ateliers d'archi spécialisés dans les bâtiments passifs

Les architectes qui ont été retenus pour ce projet sont les ateliers D-Form, en collaboration avec Mathieu Husser, situés dans le Haut-Rhin, tout comme la ville de Burnhaupt-le-Haut. Cette agence est spécialisée dans l'architecture passive. Son objectif est de construire des bâtiments publics moins gourmands en énergie et en adéquation avec le développement durable, et ce dès la conception. Depuis sa création en 2004, l'agence a participé à de nombreux projets de bâtiments publics passifs ou ayant obtenu le label BBC (Bâtiment Basse Consommation) et notamment un grand nombre d'écoles ou de groupes scolaires. Il est intéressant de regarder ce que dit Thomas Weulersse, fondateur des Ateliers D-Form, quant à la construction de cette école. Il évoque le fait que ce projet, comme les précédents, est une « opportunité de pousser un peu plus loin l'expérimentation »¹. En effet, le retour en force des approches d'architecture bioclimatique étant assez récent, de nouvelles avancées au niveau de la construction, des matériaux ou de la basse consommation énergétique arrivent chaque année. Chaque projet permet donc d'avancer et de s'améliorer pour les projets suivants. De plus, chaque bâtiment est situé sur un territoire avec des caractéristiques différentes auxquelles il faut savoir s'adapter.

¹ <https://www.envirobatgrandest.fr/wp-content/uploads/ficheburnhauptlehaut-1.pdf>

c. Un bureau d'études réputé en éco-construction

Pour ce projet, la mairie et l'agence d'architecture se sont appuyées sur le bureau d'études Terraenergie, spécialisé dans l'éco-construction et notamment la partie thermique et fluide. La maire du village soulignait lors d'un reportage qu'ils avaient voulu s'entourer de spécialistes pour la construction de cette école, car eux-mêmes ne sont pas des habitués des travaux sur bâtiment passif. Il était donc important de consulter un bureau d'études, pour savoir comment chauffer l'air de manière optimale tout en assurant la continuité thermique et d'étanchéité à l'air de l'enveloppe, comme le souligne le thermicien de Terraenergie Vincent Pierre.

d. Les relations entre les différents acteurs du projet : quelles dynamiques interprofessionnelles autour de ce projet ?

N'ayant pas réussi à joindre l'agence d'architecture, il nous est compliqué de connaître les relations qui existaient en amont et pendant le projet entre la maîtrise d'œuvre, la maîtrise d'ouvrage et le bureau d'études. Cependant, certains des rapports rédigés par les acteurs de ce projet nous donnent des indications.

Tout d'abord, la mairie semble avoir laissé une assez grande liberté aux architectes en dehors de l'emplacement de l'école. Leurs critères étaient clairs, et ils ont ensuite eu à valider le projet proposé par les ateliers D-form. La maire expliquait que le projet avait tout de suite convaincu les élus et les habitants, et deux ans après l'ouverture de l'école ils en sont toujours heureux. Cela nous permet de penser que les deux acteurs principaux étaient bien en adéquation.

Il était également nécessaire que les relations soient bonnes entre les architectes et le bureau d'études Terraenergie. En effet, la maîtrise d'œuvre n'est pas spécialiste sur les questions thermiques et de chauffage et c'est donc le bureau d'études qui a étudié ces questions. Même si les acteurs semblent satisfaits du résultat final, Vincent Pierre, thermicien de Terraenergie, pense a posteriori que la régulation CO₂ par classe aurait pu être remplacée par une régulation générale². Cela montre bien qu'un bilan est fait après une période d'utilisation, et cela permet au bureau d'études de s'améliorer et d'acquérir de l'expérience après chaque projet réalisé. C'est également pour cela que la mairie et l'agence d'architectes se sont entourées de Terraenergie. De fait, s'ils ont remarqué une piste d'amélioration, ils ont sûrement pris en compte les erreurs de leurs précédents projets pour perfectionner celui de l'école de Burnhaupt-le-Haut.

² <https://www.envirobatgrandest.fr/wp-content/uploads/ficheburnhauptlehaut-1.pdf>

III. Un bâtiment conçu et construit pour être passif dans les moindres détails

Maintenant que nous avons présenté le cadre général du projet, nous allons montrer en quoi le bâtiment peut être qualifié de passif, dans sa conception et sa construction.

1. La conception du projet : le bioclimatisme comme fil directeur

Le caractère passif du bâtiment peut avant tout être mis en évidence par son architecture bioclimatique, qui se traduit tout d'abord par une prise en compte importante du climat lors de la conception du bâtiment.

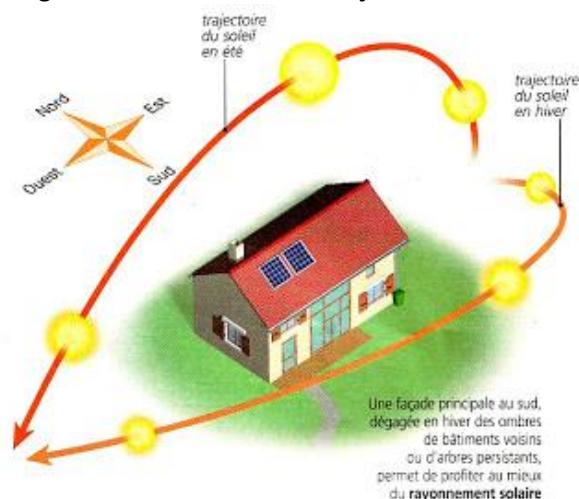
a. La prise en compte du climat dans la conception du bâti

Cette prise en compte du climat concerne aussi bien les apports solaires que la végétation, ou encore le vent.

- *Profiter au maximum des apports solaires...*

Le premier élément à prendre en compte pour réaliser un bâtiment bioclimatique est l'orientation. En effet, la principale source de consommation d'énergie d'une maison est le système de chauffage. Cela peut s'avérer d'autant plus vrai dans une école où la consommation d'eau chaude est réduite et où les appareils électroménagers sont plus rares. Il apparaît donc essentiel de faire le nécessaire pour limiter l'apport de chaleur réalisé à partir de chaudières.

Il faut cependant également éviter les surchauffes en été. Pour cela, le bâtiment doit être principalement orienté vers le sud et avoir de larges ouvertures sur cette façade.

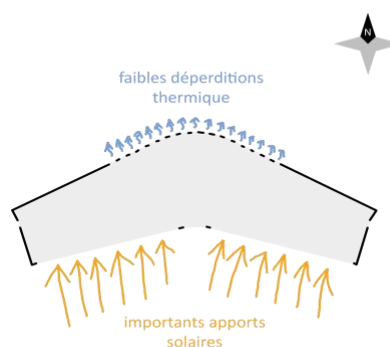


La course du soleil en été et en hiver.

Source : ADEME, 2017, *Une maison confortable, respectueuse de l'environnement, économe en énergie : construire autrement*, disponible sur : https://conseils-thermiques.org/contenu/documents/construire_autrement.pdf, p.6 [consult. 22/10/20]

En effet, durant l'hiver, le soleil fait sa course de l'est à l'ouest en passant par le sud. Les ouvertures sur la façade sud permettent donc de faire entrer la chaleur du soleil, et de chauffer le bâtiment le plus naturellement possible, par rayonnement. Sur les autres façades, et notamment du côté nord, le mieux est d'avoir le moins d'ouvertures possible car il n'y a pas d'apport notable d'énergie. Des ouvertures larges au sud et réduites au nord sont intéressantes à mettre en place d'un point de vue thermique et lumière naturelle.

Pour l'école, ces solutions ont été mises en place avec une façade sud vitrée à 85 %, ce qui permet de profiter d'apports de chaleur notables. Pour une maison passive, il est recommandé d'avoir 40 à 60 % de surface vitrée sur la façade sud. Le ratio de surface vitrée pour la façade sud est donc largement dépassé.



Comparaison des façades dans leur contribution à la thermique du bâtiment.

Source : photos : Atelier d'Architecture D-Form, 2012, disponible sur : <https://www.atelier-d-form.fr/projets/scolaire/groupe-scolaire-burnhaupt/>, [consult. 22/10/20]

schéma : Cousseau L, 2020.

- ... tout en s'en protégeant efficacement

Pour éviter les surchauffes l'été, une solution simple à mettre en place est de prolonger le débord de toit pour faire de l'ombre lorsque le soleil se situe plus haut dans le ciel l'été. Cela permet donc de limiter l'apport thermique du soleil l'été mais cela n'empêche pas le chauffage solaire l'hiver. En effet, comme on peut le voir sur le schéma de la course du soleil, celle-ci est plus basse en hiver.

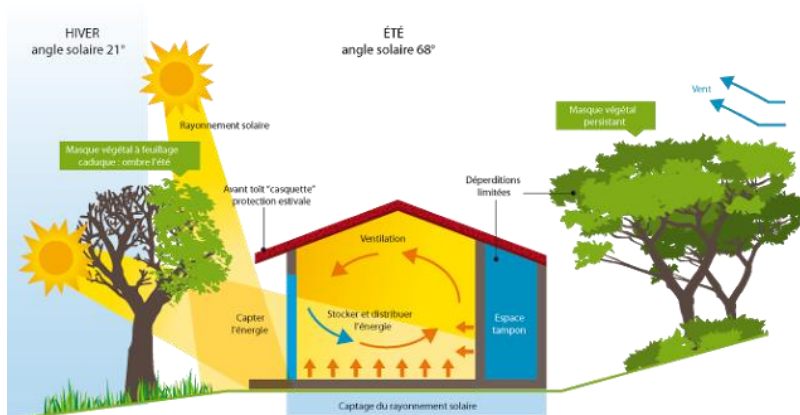
Le toit a alors également été prolongé pour faire de l'ombre en hiver. De plus, toutes les vitres sont en triple vitrage pour limiter les pertes thermiques, même si cela a un coût plus important.

Le préau de 300 m² agit également en faveur de la création d'ombre. Placé au sud, il permet d'éviter le soleil direct en été aux heures les plus chaudes sur une partie du bâtiment. Cela permet d'éviter des surchauffes et de créer un espace plus frais pour les élèves.

- Une végétation quasi-absente : avantage ou inconvénient ?

Un élément majeur de ce projet est également le fait que l'école a été construite sur un terrain très dégagé, sans arbres, ce qui permet de profiter des apports solaires. L'architecte du projet décrit d'ailleurs « un site idéal avec une orientation sud bien dégagée » (Thomas Weulersse, 2012). Les possibilités en apports solaires sont donc importantes et simples à mettre en œuvre.

Cependant, ce manque de végétation haute peut aussi s'avérer être un désavantage. En effet, les recommandations en termes d'architecture bioclimatique sont de mettre à contribution l'environnement avec par exemple, une rangée d'arbres à feuilles persistantes au nord et d'arbres à feuilles caduques au sud. Cela permet d'avoir un masque végétal persistant au nord et une adaptation à la saisonnalité au sud : l'été, les feuilles serviront de masque solaire et l'hiver, une fois tombées, elles ne gêneront pas les apports solaires directs.



Les atouts de la végétalisation des abords d'un bâtiment.

Source : e-RT2012, *Les principes de base d'une conception bioclimatique*, disponible sur : <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/explication-architecture-bioclimatique/>, [consult. 22/10/20]

- Un terrain fortement soumis au vent

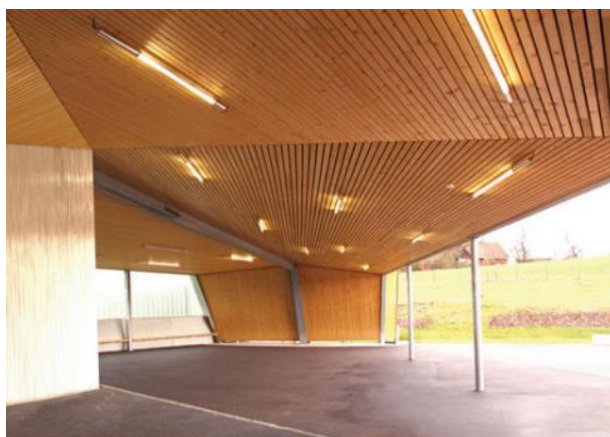
Une des composantes importantes pour la prise en compte du climat est le rapport au vent. D'après le site Windfinder, qui estime les vents dominants, celui-ci vient principalement du sud. La cour d'école est donc particulièrement soumise au vent, et aucune information ne nous permet de dire à ce jour si le vent a été pris en compte dans la conception du projet. Une haie aurait pu protéger la cour d'école et le bâtiment mais la réalisation du projet sur un terrain dégagé et de surcroît voisin d'un champ ne va pas dans le sens d'une protection.



Les vents dominants à Burnhaupt-le-Haut

Source : Windfinder, prévision à Burnhaupt-le-haut du 22/10/2020 à 14h, disponible sur : <https://fr.windfinder.com/#14/47.7331/7.1489/2020-10-22T12:00Z>, [consult. 22/10/20]

Bien que la façade sud soit soumise aux vents dominants, le préau a été conçu pour protéger du vent une partie des espaces extérieurs. En plus de limiter les apports solaires directs, le mur construit au sud permet une protection au vent efficace. Ainsi, le préau agit comme un véritable espace de fraîcheur dans la cour de l'école.



L'espace du préau avec le mur de protection au vent

Source : Atelier d'Architecture D-Form, 2012, disponible sur : <https://www.atelier-d-form.fr/projets/scolaire/groupe-scolaire-burnhaupt/>, [consult. 22/10/20]

L'architecture bioclimatique du bâtiment passe aussi par sa compacité et son organisation intérieure.

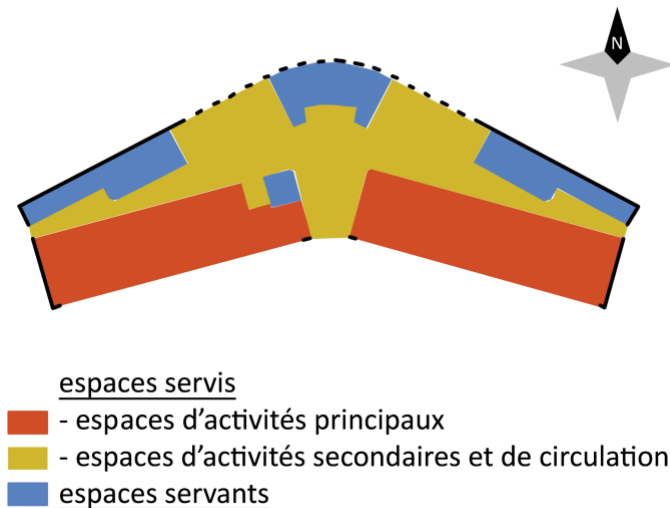
b. Une alternative à la compacité

Le bâtiment est de plain-pied, même si certains espaces sont assez hauts sous-plafond. Cela a l'inconvénient de créer une importante surface déperditrice. Le bâtiment n'est en effet pas de compacité maximale. Le bâtiment a une surface de 1130 m². Une des solutions mise en place pour minimiser la perte d'énergie et maximiser les apports solaires est d'étirer la surface au sud.

c. Une organisation intérieure basée sur les éléments naturels

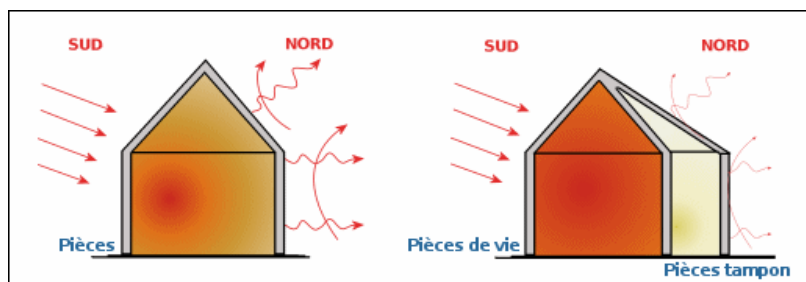
L'organisation en plan des espaces prend en compte les aspects climatiques et géographiques. On peut voir sur ce schéma que les espaces servis, qui sont les espaces les plus habités au sens où les usagers du bâtiment y passent le plus de temps, sont largement tournés vers le sud. Les espaces d'activités principaux sont les classes et salles réservées aux professeurs. Les usagers peuvent y passer du temps pour travailler.

Les espaces d'activités secondaires sont la bibliothèque et la salle pluriactivité, dans lesquels les élèves viennent par intermittence. Les espaces de circulation et le hall peuvent aussi être considérés comme des espaces servis car dans une école, ils peuvent se révéler être de véritables lieux de vie.



Source : Cousseau L, 2020.

Enfin, on remarque que les espaces servants se trouvent tous en façade nord ou sans accès direct à l'extérieur. Ils n'interagissent donc que très peu avec l'extérieur. On peut les considérer comme des espaces tampons. Ces pièces ne sont pas forcément chauffées mais elles permettent de ralentir le phénomène de déperdition thermique. Cela est une solution particulièrement pertinente en conception bioclimatique puisque ces espaces peu utilisés servent en quelque sorte à l'isolation des espaces vécus.



Source : Fiabibat, *Le bioclimatisme à la loupe*, disponible sur : <https://www.fiabibat.com/travaux-pratiques-mise-en-application/>, [consult. 22/10/20]

Le caractère passif du bâtiment se traduit aussi par les méthodes d'éco-construction utilisées lors de sa construction.

2. La mise en œuvre du projet : l'éco-construction privilégiée

a. Des matériaux principalement biosourcés

L'éco-construction mise en œuvre passe tout d'abord par l'utilisation dominante de matériaux biosourcés.

- *Des matériaux aux origines diverses*

L'agence d'architecture D-Form a à cœur de mettre en œuvre des matériaux sains dans les bâtiments qu'elle conçoit. L'architecte dit à ce propos : « Nous recherchons des matériaux sains et des techniques performantes. La plupart ont dû être importés d'Allemagne, car encore rares en France » (Thomas Weulersse interrogé par Élisabeth Schulthess, *La maison passive*, décembre 2011). À la construction du bâtiment, ces matériaux n'étaient que peu présents en France, et l'architecte n'a pas hésité à aller se fournir en matériaux au-delà des frontières françaises pour réaliser ce bâtiment. Une telle démarche permet de diffuser et de

communiquer sur de nouvelles méthodes de conception innovantes et moins néfastes pour l'environnement. Cependant, même si ce mode de conception peut être intéressant dans un premier temps, il est important de valoriser des filières locales lorsqu'elles sont mises en place afin de limiter les transports de matières, émissifs en gaz à effet de serre.

La provenance des différents bois utilisés n'est pas mentionnée. Sur la fiche projet du site du prix national de la construction bois, il est simplement écrit que du sapin et de l'épicéa ont été utilisés, respectivement pour les poutres et pour la charpente, les revêtements extérieurs et intérieurs.

- *Une dalle en partie éco-construite*

La dalle est en béton et est isolée avec de la mousse de verre recyclé. Le radier est ferrailé sur 40 cm pour reprendre les murs en béton. La dalle a été coulée en deux fois, mais sans joint de dilatation, car l'importante isolation ne générera que de faibles écarts de température.

- *Des murs extérieurs bio et géosourcés*

Les murs extérieurs sont conçus comme une ossature bois avec des panneaux de bois. Tous les isolants des parois sont biosourcés et issus du bois : laine de bois rigide, laine de bois souple, ouate de cellulose. Les poteaux sont en bois massif et les poutres en lamellé collé, tandis que les contreventements sont en panneaux OSB. Le bardage extérieur des façades est en terre cuite. Il a été choisi pour le faible entretien qu'il nécessite. Il est coloré dans les teintes jaunes à rouge. Dans les différents projets de l'agence d'architecture, on retrouve souvent des matériaux colorés sur les façades des bâtiments. Le bardage Alphonon de l'entreprise Moeding n'a pour autant aucune performance environnementale particulière car il ne dispose pas de Déclaration environnementale.

- *Une toiture évolutive*

La toiture est construite en zinc, tout comme les sous-faces exposées au nord. L'architecte explique que la structure a été dimensionnée pour pouvoir accueillir une toiture végétalisée. « On remarque cependant que la structure mise en œuvre pour la charpente, bien que légère, résistera aussi bien à l'emploi du zinc que d'une toiture végétalisée ce qui permet de faire différents choix sans grands bouleversements de structures. » Thomas Weulersse (3ème Forum International Bois Construction 2013). On peut alors se demander pourquoi une telle toiture n'a pas été mise en place dès le début. On peut émettre l'hypothèse que cela s'explique par des contraintes budgétaires.

- *L'inertie des murs intérieurs*

Les murs extérieurs sont associés à des murs de refends intérieurs en béton, pour assurer l'inertie thermique. Ces murs ont été préfabriqués. Cela permet de réduire le temps de chantier et est facile à mettre en œuvre. On peut pourtant regretter l'usage du béton ici, il existe en effet d'autres manières d'apporter de l'inertie à un bâtiment avec des matériaux ayant de meilleures qualités environnementales comme par exemple la terre crue ou le béton de chanvre.

- *Des menuiseries durables*

Les menuiseries sont mixtes bois-alu. Cela permet de minimiser l'entretien en extérieur, les menuiseries pouvant être soumises aux aléas climatiques, tout en offrant des espaces intérieurs chaleureux.

- *Mobilier et finitions : le bois à l'honneur*

Le mobilier intégré est en bois massif pour éviter la diffusion de particules polluantes dans l'air. De même, les panneaux de particules sont à faible teneur en colles toxiques. Le sol est en linoléum naturel. Les peintures et les lasurements sont bio. Sur cette image, on peut voir les meubles et les finitions en bois de part et d'autre du

tableau. Pour les finitions, on retrouve du bois massif en lattes en sous-face du plafond du préau et des panneaux trois-plis en sous-face et en finitions.

Des finitions en bois dans les classes.

Source : Atelier d'Architecture D-Form, 2012, disponible sur :

<https://www.atelier-d-form.fr/projets/scolaire/groupe-scolaire-burnhaupt/>, [consult. 22/10/20]



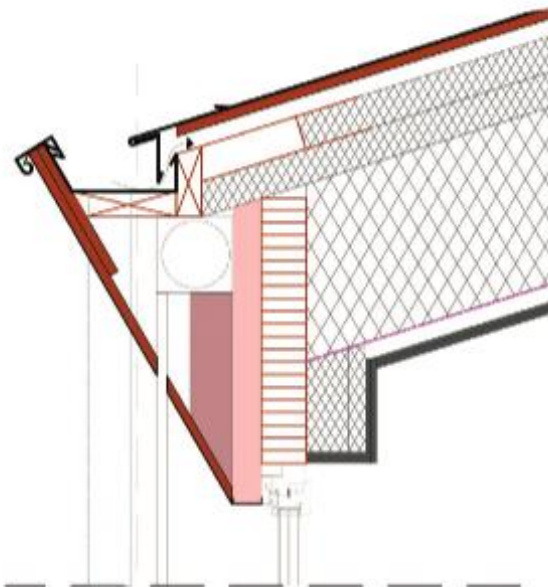
L'éco-construction passe également par les méthodes de construction utilisées, adaptées aux matériaux.

b. Des méthodes constructives adaptées aux matériaux

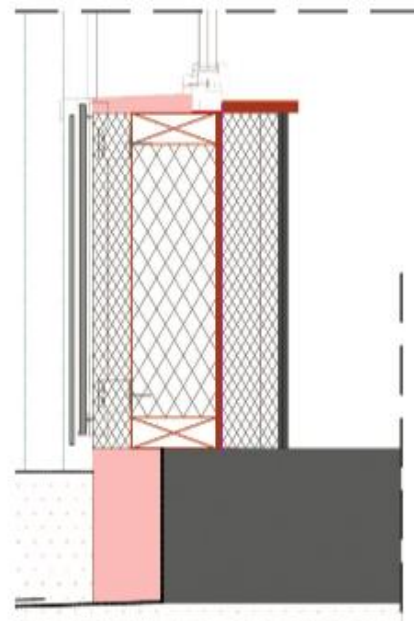
L'ossature périphérique du bâtiment est en bois. Le radier et les murs de refend sont en béton. L'enveloppe extérieure est en ossature bois et la charpente est composée de chevrons en poutre en I en bois de 400 mm de haut. Le bardage en céramique est fixé sur les montants de l'ossature en aluminium.

Une autre part essentielle de l'éco-construction et du caractère passif du bâtiment est l'optimisation de son isolation thermique.

3. Isolation thermique



Isolation de la toiture (de l'intérieur vers l'extérieur : frein vapeur, panneau de bois, poutre en I avec ouate de cellulose, laine de bois rigide, pare pluie avec lame d'air et zinc).



Isolation des murs extérieurs (de l'intérieur vers l'extérieur : frein vapeur, plaque de plâtre avec contre latte, laine de bois, panneau de bois OSB, ossature bois avec ouate de cellulose, laine de bois, pare pluie avec contre lattage et terre cuite).

Source : energivie.info, Livret Burnhaupt Énergivie, octobre 2014, fichier pdf téléchargeable ici :

https://sb5e98e19dfecfaf.jimcontent.com/download/version/1454498232/module/10543771123/name/LIVRET%20BURNHAUPT%20ENERGIVIE_HD.pdf, [consult. 05/10/2020]

- *Isolation du toit et des murs extérieurs*

Le toit et les murs extérieurs sont faits d'une ossature bois préfabriquée très large (46 cm pour les murs, 56 cm pour le toit), ce qui leur permet de contenir beaucoup d'isolants. Cette isolation est faite avec de la ouate de cellulose et de la laine de bois. Ce sont tous les deux des matériaux biosourcés, obtenus respectivement à partir de papiers recyclés et de fibres végétales, auxquels ont été ajoutés des additifs pour résister au feu et aux moisissures. La façade est constituée d'un bardage en terre cuite calorifugée.

- *Isolation du sol*

Le sol comporte un remblai de 60 cm en mousse de verre recyclé posé sur un radier en béton de 40 cm. Il y a en plus un géotextile entre l'isolant et le radier, ce qui permet de supprimer les déperditions thermiques par le sol.

- *Isolation des portes et fenêtres*

Les fenêtres des murs sont en triple vitrage et celles du toit en quadruple vitrage.

	Composition (int vers ext)	λ	e	Rth	U
		W/m.K	cm	m ² .K/W	W/m ² .K
Murs Ext.	2 BA 13	0,32	2,6	0,08	0,09
	Laine de bois	0,04	14	3,50	
	Panneau bois	0,15	1,5	0,10	
	Ouate de cellulose	0,04	22	5,00	
	Laine de bois	0,04	10	2,38	
	Total	0,04	50,1	11,06	
Toiture	2 BA 25	0,32	5	0,16	0,08
	Ouate de cellulose	0,04	40	9,09	
	Laine de bois	0,05	16	3,48	
	Total	0,05	61	12,73	
Plancher bas	Béton lourd	2,3	40	0,11	0,12
	Technopor	0,008	60	8	
	Total	0,1	100	8,11	
Fenêtres	Triple vitrage bois	Uw = < 0,85			

Source : Alsace Énergivie, 2013, fiche_Burnhaupt, p3, disponible sur :
http://www.fibres-energivie.eu/sites/default/files/fiche_burnhaupt.pdf

Cette optimisation de l'isolation thermique se couple à une maximisation de l'étanchéité à l'air du bâtiment, dans le but de limiter au maximum les déperditions thermiques.

4. Étanchéité à l'air

Les murs comportent un frein vapeur pour bloquer la propagation de vapeur d'eau et un pare-pluie pour empêcher les infiltrations d'eau.

L'étanchéité à l'air est assurée tout au long du projet, à la fois en phase de construction avec une étude des points singuliers pour assurer la continuité du frein vapeur, et en phase de construction en étanchéifiant toutes les traversées de gaines techniques et électriques et en minimisant les percements de l'enveloppe étanche.

Enfin, un dernier élément important de l'éco-construction de ce bâtiment est sa gestion de l'énergie. Elle passe aussi bien par des systèmes de production que de gestion d'énergie.

5. Équipements de production et de gestion d'énergie

a. De production d'énergie

Le bâtiment est ainsi doté de plusieurs équipements de production d'énergie : une chaudière à granulés de bois pour le chauffage du bâtiment, et des panneaux photovoltaïque pour la production d'électricité, qui est en partie revendue.

- *La chaudière à granulés de bois*

Le chauffage du bâtiment est assuré par une chaudière à granulé de bois de 22 kW et de rendement de production de 95 %. Grâce au stockage dans un ballon tampon de 400 L, à une arrivée d'air étanche et à une isolation maximale des conduites de distribution, le stockage et la distribution ont un rendement de 100 %.

- *Les panneaux photovoltaïques*

Le bâtiment comporte également 280 m² de panneaux photovoltaïques, de production annuelle 33 000 kWh. Ils sont disposés sur une pente de toiture optimisée pour garantir un rendement optimal toute l'année.

b. De gestion d'énergie

Le bâtiment comporte aussi des équipements associés aux systèmes de ventilation et d'éclairage qui permettent de faire des économies d'énergie.

- *Le système de ventilation*

La ventilation du bâtiment est assurée par une ventilation mécanique double flux haute performance. Le double flux permet de récupérer de la chaleur de l'air extrait et ainsi de diminuer de 70 à 90 % les déperditions de chaleur dues au renouvellement de l'air, et ainsi des économies d'énergie de 20 à 30 %. Ce système est équipé à la fois d'une horloge hebdomadaire et de sondes thermiques et CO₂ pour moduler les débits d'air selon l'occupation des salles. De plus, les réseaux aérauliques, réseaux qui assurent l'extraction et la distribution d'air, sont très étanches, ce qui permet de réduire au maximum les fuites.

- *Le système d'éclairage*

Des économies d'énergie au niveau de l'éclairage sont réalisées grâce à la mise en place de détecteurs de présence dans les parties communes mais aussi de détecteurs de luminosité permettant de régler l'intensité de l'éclairage en fonction de la lumière naturelle.

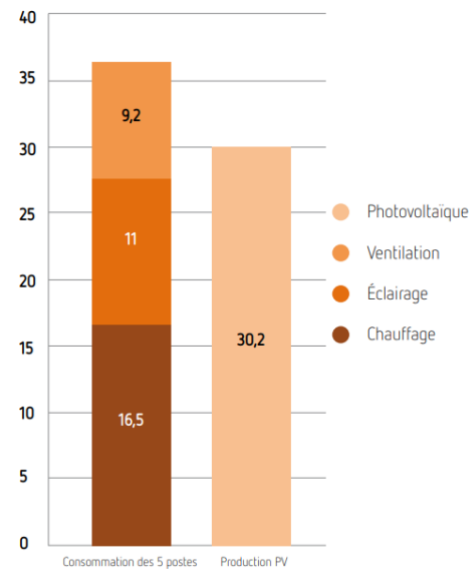
IV. Retour sur expérience une fois le bâtiment réalisé

Nous avons donc présenté les moyens qui ont été utilisés afin de permettre au bâtiment de produire plus d'énergie qu'il n'en consomme. Nous allons maintenant voir si les performances réelles de l'école ont été à la hauteur des attentes des concepteurs, tout d'abord énergétiquement puis en terme de durées et de coûts. Enfin nous évoquerons la satisfaction globale liée au projet, du point de vue des concepteurs mais aussi des utilisateurs.

1. Performances réelles du bâtiment

L'objectif du projet était de concevoir un bâtiment qui produise plus d'énergie qu'il n'en consomme. En réalité, cet idéal n'a pas pu être complètement atteint, à cause de la part trop importante du chauffage dans le bilan annuel des consommations. Pourtant, les concepteurs ont tout de même réussi à minimiser le plus possible le rapport de l'énergie consommée sur l'énergie produite. Qui plus est, on peut imaginer qu'un tel bâtiment puisse effectivement produire plus d'énergie qu'il n'en consomme s'il se trouvait dans une région plus chaude, nécessitant moins de chauffage. De plus, il faut noter que les consignes de températures sont

de 20°C en occupation et 17°C en inoccupation, des chiffres qui pourraient être revus à la baisse afin de réduire encore la consommation de chauffage (la consigne standard de température idéale est en générale de 18°C).



Décomposition de la consommation d'énergie primaire (Cep - RT2005) comparée à la production photovoltaïque estimée. Valeurs exprimées en kWh ep/m² SHONRt.an.

- *Point sur l'unité de la réglementation thermique*

Le graphique ci-contre exprime ses valeurs en kWh_{ep}/m² SHONRt.an (unité Cep RT2005).

Cette grandeur est définie et utilisée dans les réglementations thermiques et comprend les éléments suivants :

- L'énergie primaire en kWh (kWh_{ep}), qui représente l'énergie nécessaire à la production de toute l'énergie finale utilisée dans la consommation. Il s'agit donc de prendre en compte les pertes lors de la production, la transformation et la distribution de l'énergie.

- La surface SHONRt en m² (m² SHONRt), qui représente la surface administrative prise en compte dans les calculs des réglementations thermiques. Il s'agit en fait de la surface délimitée par les murs extérieurs, à laquelle on enlève des surfaces particulières (les pièces non chauffées par exemple) afin de se rapprocher au plus possible de la surface chauffée. Pour ce projet, SHONRt = 1120 m².

Source du graphique : energivie.pro, 2016, *École élémentaire à énergie positive de Burnhaupt-le-Haut*, p4, disponible sur : <https://www.envirobatgrandest.fr/wp-content/uploads/ficheburnhauptlehaut-1.pdf>

On observe que le poste de chauffage constitue la part la plus importante de la consommation, alors que celui-ci ne fonctionne pas toute l'année. En effet, la consommation de chauffage dépend fortement des conditions de température extérieure et donc des saisons, et elle peut également varier d'une année sur l'autre. Il en va de même pour la production des panneaux photovoltaïques qui dépend de l'éclairement.

Par conséquent, même si la production compense presque la consommation sur le bilan annuel, il est probable que ce ne soit pas le cas en fonction des saisons. Par exemple, un hiver froid et peu ensoleillé conduira à une consommation de chauffage plus importante et une production photovoltaïque plus faible que la moyenne, tandis qu'un été chaud et ensoleillé aura l'effet inverse.

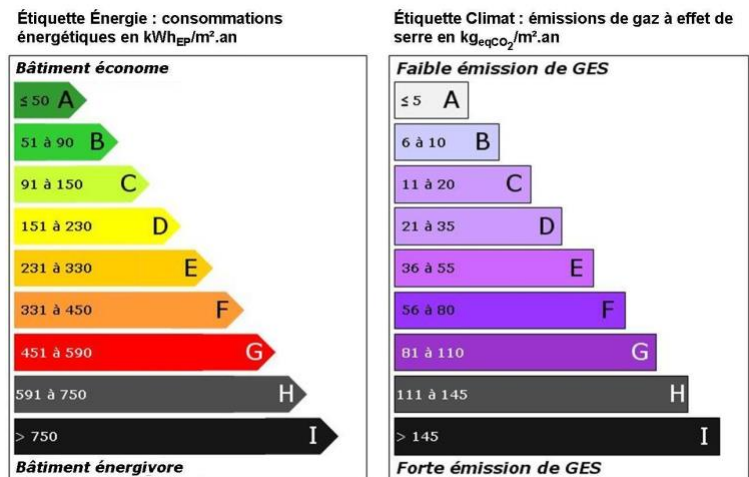
De manière plus quantitative, la consommation du bâtiment est en moyenne de 37,1 kWh_{ep}/m² SHONRt.an, ce qui lui permet de se placer bien en dessous de la moyenne française (environ 200 kWh_{ep}/m² SHONRt.an) et de se qualifier comme bâtiment basse consommation (classe A). En effet, la réglementation thermique RT2012 définit les bâtiments basse consommation comme consommant moins de 50 kWh_{ep}/m² SHONRt.an d'énergie primaire en moyenne. Qui plus est, ce chiffre est pondéré par un coefficient dépendant du type de construction, en particulier 1,8 pour les bâtiments d'enseignement, ce qui nous amène à 90 kWh_{ep}/m² SHONRt.an pour la limite basse consommation.

On observe donc que la performance de l'école s'inscrit bien dans les tendances réglementaires, d'autant plus que si l'on prend en compte la production moyenne de 30,2 kWh_{ep}/m² SHONRt.an d'énergie électrique grâce aux panneaux photovoltaïques, on se ramène à un bilan de 6,9 kWh_{ep}/m² SHONRt.an ce qui semble excellent.

D'un point de vue des émissions de gaz à effet de serre engendrées par l'utilisation du bâtiment, les calculs du Pôle Alsace Énergivie à partir des bases de données de l'ADEME (Agence de la transition écologique) amènent à un résultat de 1,7 kgCO₂/m².an ce qui, par rapport à l'échelle de classement GES (voir ci-contre), permet à l'école d'entrer dans la meilleure catégorie (Classe A) réservée aux émissions de moins de 5 kgCO₂/m².an en moyenne.

Le projet se situe donc aussi très bien au niveau des émissions polluantes, tout au moins pour ce qui est de l'utilisation du bâtiment.

Source : Syndicat Départemental d'Énergie de l'Allier, 2015, *Les diagnostics de performance énergétique*, disponible sur : <https://www.sde03.fr/missions/energie/les-diagnostic-de-performance-energetique-pour-les-batiments-publics/>



2. Coûts et durées

L'évaluation de la réussite du projet doit également reposer sur les coûts et les durées de ses différentes étapes.

En termes de coûts, que l'on parte du prix de la simple construction (1282 €/m²) ou du coût net total sans les subventions (1588 €/m²), on se trouve parfaitement dans la fourchette des prix « classiques » de construction, de 1100 à 1600 €/m² environ. Cela montre bien que l'utilisation de matériaux spécifiques plus respectueux de l'environnement, mais aussi l'installation des équipements supplémentaires comme les panneaux photovoltaïques, n'augmentent pas nécessairement le coût des projets innovants par rapport aux chantiers plus traditionnels.

Tableau récapitulatif des coûts liés au projet de l'école de Burnhaupt

Source : Alsace Énergivie, 2013, *fiche_Burnhaupt*, p3, disponible sur : http://www.fibres-energivie.eu/sites/default/files/fiche_burnhaupt.pdf

	HT	€/m ²
Construction	1 733 300 €	1 282 €
Prestations intellectuelles	205 500 €	152 €
VMC	52 000 €	39 €
Chauffage	38 000 €	28 €
Panneaux PV	118 100 €	87 €
Total	2 146 900 €	1588 €
Subvention : ADEME, Région Alsace		
Total	124 000 €	92 €
Coût net	2 022 900 €	1496€/m²

Au-delà des coûts de construction et de mise en place du projet, les coûts d'utilisation du bâtiment sont également un facteur important de la réussite du projet.

Du fait de la conception passive du bâtiment, l'énergie nécessaire à l'utilisation de la structure (chauffage, éclairage et ventilation) est très limitée, ce qui réduit fortement les coûts liés à la consommation par rapport à d'autres bâtiments. De plus, l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques revendue permet de réduire encore le bilan des coûts d'utilisation de l'école.

On considère une électricité achetée 0,1557 €/kWh (prix Tarif Bleu EDF 2020) et revendue 0,06 €/kWh (prix réglementé pour les installations de plus de 9 kWc), ainsi que des granulés de bois pour la chaudière à 0,07 €/kWh (estimation moyenne entre les différents types de combustibles). Ces chiffres nous permettent de construire le tableau suivant :

	Prix (€/kWh)	Consommation (kWh _{EP} /m ² .an)	Prix au m ² (€/m ² .an)	Prix total (€/an)
Achat d'électricité (éclairage et ventilation)	0,1557	20,2	3,14514	3522,5568
Revente d'électricité (photovoltaïque)	0,06	-30,2	-1,812	-2029,44
Achat du combustible (chaudière)	0,07	16,5	1,155	1293,6
Total		6,5	2,48814	2786,7168

Tableau de synthèse du calcul des coûts d'utilisation du bâtiment

Source : Troussard G, 2020

D'après une étude QuelleEnergie, le coût moyen du chauffage en France en 2017 s'étendait de 5,90 €/m² (chauffage au bois) à 16,10 €/m² (chauffage électrique).

Par rapport à ces chiffres, les coûts d'utilisation du projet semblent excellents, en effet les dépenses liées au chauffage sont extrêmement réduites et les autres dépenses sont également modestes.

Si on ajoute à cela les économies réalisées grâce aux panneaux photovoltaïques, on obtient un coût d'utilisation vraiment très faible d'environ 2,49 €/m².an qui confirme la pertinence financière du projet. En effet bien que ce coût existe, contrairement à certains projets de maisons à énergie positive pour lesquels le propriétaire fait un bénéfice chaque année, il faut se rappeler qu'il s'agit ici d'une école et non d'une maison, ce qui implique certaines contraintes mais surtout une bien plus grande surface, ce qui impacte fortement le comportement thermique du lieu de façon désavantageuse.

Si l'on s'intéresse maintenant aux durées du projet, on observe deux phases distinctes :

- la phase d'étude de mars 2010 à avril 2011 ;
- la phase de travaux de mai 2011 à septembre 2012.

On remarque tout de suite que la durée de la phase d'étude est particulièrement longue, presque aussi longue que la construction elle-même, ce qui est sans aucun doute un avantage pour un tel projet. Il est effectivement très important que les différents acteurs se mettent d'accord et planifient le tout à l'avance, afin d'assurer la cohérence des démarches et du projet global ainsi que le bon déroulement des travaux. Cette longue phase d'étude est donc l'un des ingrédients de la réussite du projet, comme le confirment des exemples d'autres constructions telles que la maison Z.E.N par exemple.

En revanche, la phase de construction ne semble pas si longue pour un tel bâtiment, ou du moins pas plus longue que pour la construction d'un édifice plus traditionnel. En effet, selon *Méthodes BTP*, il faut compter au strict minimum 2h de chantier par m², soit avec des journées de 8h, 280 jours au moins pour cette école. En réalité, la construction a duré environ 500 jours mais cela reste assez court sachant que les acteurs du projet n'avaient jamais construit de bâtiment de cette manière. Cette vitesse est due aux méthodes innovantes de construction utilisées et à la très bonne planification antérieure.

Pour résumer, les concepteurs ont veillé à ne conserver que le strict nécessaire dans le projet en éliminant tout équipement superflu et en restant simple, ce qui a permis des délais courts et des coûts réduits. Les performances élevées du bâtiment, notamment thermiques, ainsi que l'utilisation de panneaux photovoltaïques, assurent quant à elles un très bon bilan financier lors de son utilisation.

3. Satisfaction et évaluation globale

Question de l'appropriation par les usagers notamment

Afin de s'assurer de la réussite d'un projet, il est toujours utile de mettre en place un système de retour sur expérience qui permet de vérifier les performances du bâtiment et leur évolution au cours du temps, mais aussi de recueillir les témoignages des acteurs et des utilisateurs. Cela permet d'évaluer quantitativement et qualitativement la satisfaction des usagers par rapport au projet.

Le projet de l'école de Burnhaupt a donc intégré un processus de retour sur expérience constitué en particulier d'un suivi énergétique complet. La démarche d'un tel suivi est la suivante :

1. Mesure des performances du bâtiment au cours du temps (énergie consommée/produite par poste, températures intérieures et extérieures, qualité de l'air...),
2. Mise en évidence des écarts entre les mesures et les performances théoriques, explication des écarts,
3. Évaluation des impacts qu'ont eu les décisions lors de la conception et la construction,
4. Mesure de la rentabilité et des divers coûts,
5. Analyse critique des outils de conception,
6. Recueil des témoignages des acteurs et des utilisateurs, évaluation du confort.

Toutes les données collectées lors de cette démarche et leur analyse sont stockées sur un serveur internet accessible à tous les intervenants du projet, ce qui permet une bonne diffusion des informations et ouvre aux discussions. Cet aspect est non négligeable car cela permet aux acteurs de s'améliorer à chaque nouvelle

construction, et la non-communication entre les différentes parties est souvent un facteur d'échec dans ce genre de projet.

Conclusion

Comme nous avons pu le voir précédemment, les problématiques liées à la construction de bâtiments plus respectueux de l'environnement apparaissent nombreuses, mais pas insurmontables. En effet, au final les concepteurs de l'école de Burnhaupt-le-Haut sont parvenus, grâce à une gestion de projet experte, de bonnes dynamiques de communication et de préparation entre les différents acteurs, et des méthodes innovantes, à surmonter tous ces défis pour créer un bâtiment exemplaire. Ainsi, les objectifs en termes énergétiques, financiers, mais aussi de qualité de vie et d'usages dans cette école semblent avoir été atteints, malgré quelques limites (difficultés et regrets, notamment du thermicien à propos de la régulation du CO2). Car même si tout n'est pas parfait, les constructeurs ont pu apprendre de leurs erreurs et s'améliorer en conséquence grâce à un ingénieux système de retour sur expérience, faisant de ce projet une inspiration pour les chantiers futurs.

Bibliographie

Alsace énérgivie. fiche_Burnhaupt. 2013. p.3. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.fibres-energie.eu/sites/default/files/fiche_burnhaupt.pdf

Baie vitrée pour une maison passive : quelles sont les règles à respecter ? *Tryba* [en ligne]. 22 octobre 2017. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.tryba.com/art-de-vivre/donner-vie-projet/baie-vitree-maison-passive/>

Ecole des sources. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.prixnational-boisconstruction.org/rechercher-un-projet/3664?keywords=burnhaupt&participations%5B0%5D=13&participations%5B1%5D=7&participations%5B2%5D=2&participations%5B3%5D=6&participations%5B4%5D=8&participations%5B5%5D=9&participations%5B6%5D=10&participations%5B7%5D=11&participations%5B8%5D=12&orderBy=date_desc

EDF. *Grille de prix de l'offre de fourniture d'électricité « Tarif Bleu »*. 2020. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : https://particulier.edf.fr/content/dam/2-Actifs/Documents/Offres/Grille_prix_Tarif_Bleu.pdf

Elyotherm. *Argus des énergies – Prix 2018*. 2018. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://elyotherm.fr/comparatif-cout-energies-kwh>

Energie.info. *École élémentaire à énergie positive de Burnhaupt-le-Haut*. octobre 2014. [Consulté le 21 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : https://sb5e98e19dfecfaf.jimcontent.com/download/version/1454498232/module/10543771123/name/IVRET%20BURNHAUPT%20ENERGIVIE_HD.pdf

energie.pro. *École élémentaire à énergie positive de Burnhaupt-le-Haut* [en ligne]. 2016. p.4. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.envirobatgrandest.fr/wp-content/uploads/ficheburnhauptlehaut-1.pdf>

Grobe C. *Construire une maison passive*. 2008.

Lequeux C. *La facture de chauffage des Français est de 1683€ en moyenne en 2017*. *QuelleEnergie* [en ligne]. 2017. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.quelleenergie.fr/magazine/economies-energie/facture-moyenne-chauffage-francais-2017-60815/>

Les maisons écologiques [en ligne]. janvier 2009. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://lesmaisonsecologiques.blogspot.com/>

Loyau F. *La RT2012 à la loupe* [en ligne]. 2013. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.fiabitat.com/series/rt2012-a-la-loupe/>

L'architecture bioclimatique. *Conseils-thermiques* [en ligne]. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://conseils-thermiques.org/contenu/bioclimatisme.php>

Première école à énergie positive en zone sismique. *Batiweb* [en ligne]. 13 juin 2013. [Consulté le 05 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.batiweb.com/actualites/developpement-durable/premiere-ecole-a-energie-positive-en-zone-sismique-2013-06-13-22418>

Ricaud A, Lokhat I. *Construire une maison à énergie positive*. 2010.

Société Moeding Keramikfassaden GmbH. Avis technique Alphanon QF. mars 2012. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.moeding.de/wp-content/uploads/AT-Alphanon-QF-2-16_1721.pdf

Télé Doller, Reportage sur l'école BEPOS de Burnhaupt le haut [en ligne]. 13 juin 2013. [Consulté le 05 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.dailymotion.com/video/xoa3vy>

Une maison confortable, respectueuse de l'environnement, économe en énergie : construire autrement. *ADEME* [en ligne]. novembre 2007. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : https://conseils-thermiques.org/contenu/documents/construire_autrement.pdf

Valente C. *Définir une organisation de chantier*. 2015. [Consulté le 22 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://methodesbtp.com/articles/definir-une-organisation-de-chantier/>

Weulersse Thomas. *Conception optimisée pour une école passive à énergie positive. Ecole de Burnhaupt-le-Haut* [en ligne]. 2013. [Consulté le 21 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.forum-holzbau.com/pdf/FBC_2013_Weulersee.pdf