

La Maison Z.E.N

Alain RICAUD, Ismaël LOKHAT
 CYTHELIA, 350 route de la Traverse
 73000 Montagnole
www.cythelia.fr

Résumé : la Maison Z.E.N (Zéro Energie Nette), inaugurée en Novembre 2007 est la première maison à énergie positive de France. Nous rappelons les principes qui ont guidé sa conception et justifions les choix qui ont été faits. Après quatre années d'exploitation, nous donnons les principaux résultats du suivi de performance qui montrent que l'objectif annoncé à l'époque est vérifié.

1. Enjeux et contexte

Le bâtiment (secteur Résidentiel-Tertiaire) représente 44% de la consommation d'énergie finale. En termes d'émissions de gaz à effet de serre, ce secteur représente 22% des émissions (chiffres 2005, source Agence Européenne de l'Environnement, juin 2007).

Sur les 92 Mt eq CO₂, concernant ce secteur, 67% sont attribués au résidentiel, donc à l'habitat.

Compte tenu des très grandes marges de manœuvre en termes de procédés constructifs (isolation) et de systèmes actifs (pompes à chaleur), les pouvoirs publics ont tout naturellement décidé de faire porter en priorité l'effort sur ce secteur à travers les différentes réglementations thermiques (RT 2000, RT 2005 et maintenant la RT 2012, qui rend obligatoire la construction de tous les bâtiments neufs en BBC) avec l'objectif que tous les bâtiments neufs soient à énergie positive en 2020. Avec une première étude de faisabilité réalisée en 2004, une construction démarrée en 2006, et une inauguration 2007, la Maison Z.E.N avait pour ambition de démontrer qu'il était possible de construire ce type de bâtiment avec des matériaux et technologies déjà disponibles sur le marché.

2. Le concept ZEN

La conception d'une maison à énergie positive ne dissocie pas le bâtiment et la partie énergétique. La recherche de performance énergétique est globale : une approche systémique et multidisciplinaire permet d'assurer à la fois une bonne qualité architecturale, un environnement intérieur sain, une faible consommation d'énergie et une production locale.

L'idée d'un bâtiment qui soit complètement autonome en énergie n'est pas nouvelle. Plusieurs réalisations existent. Hélas, celles-ci font souvent intervenir des moyens de stockage onéreux (batteries électrochimiques au Pb-acide ou système électrolyseur - hydrogène - pile à combustible) tant au niveau de l'investissement que de l'entretien, les cantonnant à l'expérimentation.

La maison Z.E.N qui, sur l'année, produit autant d'énergie qu'elle en consomme, n'est pas autonome dans le sens où elle pourrait se passer de la connexion

au réseau. C'est en fait ce dernier qui lui assure son « stockage nocturne » et « inter-saisonnier ». En somme, **elle est interdépendante, mais n'échange avec l'extérieur que de l'eau, de l'air, de l'électricité et de l'information.** Ses apports énergétiques lui sont fournis sous forme électrique, prélevée sur son toit photovoltaïque ou sur le réseau de distribution et dans l'air où sont prélevées les calories gratuites dont elle a besoin pour se chauffer.

La démarche qui a guidé la conception de la maison Z.E.N est globale : le bâtiment est vu comme un ensemble de fonctions, et non comme une juxtaposition d'éléments qu'il s'agirait d'optimiser individuellement. Par exemple : il n'est pas envisageable de bien isoler les parois opaques tout en négligeant les vitrages, pas plus qu'il n'est permis de réduire les ouvrants au détriment de l'éclairage naturel. De même, il a fallu prendre en compte les interactions entre les différents systèmes actifs.

La première étape de la conception est la réduction des besoins énergétiques.

On regroupe ces besoins au sein de trois ensembles :

- ▲ chauffage/rafraîchissement/ventilation ;
- ▲ éclairage ;
- ▲ eau chaude sanitaire.

Dans un autre ensemble - électricité spécifique -, on regroupe tous les besoins qui ne peuvent être assurés que par le vecteur électricité, tels que la bureautique, la hi-fi, etc. On y inclut aussi les besoins énergétiques pour la cuisine (même si elle aurait pu se faire au gaz, ou toute autre source).

L'objectif étant de ne pas dépasser les 50 kWh/m²/an en énergie finale. Une fois cet objectif atteint, le bâtiment doit pouvoir produire une quantité d'énergie au moins équivalente pour pouvoir prétendre à l'appellation « Zéro Energie » ou « Energie positive ». Celle-ci est le plus souvent obtenue au moyen d'une installation photovoltaïque.

Nous présentons ci-après les aspects relatifs à l'architecture, le mode constructif et les systèmes de chauffage, ventilation et eau chaude sanitaire, ainsi que le système photovoltaïque.

3. Architecture, matériaux et systèmes

3.1. L'architecture

Afin de limiter les déperditions il est nécessaire de minimiser le ratio surface déperditive/volume et donc de maximiser la compacité du bâtiment. Une bonne maîtrise du volume permet de limiter les déperditions et la meilleure forme pour cela est la yourte mongole.

Dans le cas de l'habitation Z.E.N, nous avons réfléchi à l'intégration du bâtiment dans son environnement géographique. Nous avons donc adopté un style simple, qui reprend l'esthétique des constructions savoyardes, avec un toit à deux pentes égales de 38°, l'inclinaison optimale pour une installation photovoltaïque.

Les débords de l'étage permettent de gagner de la surface habitable à l'étage et d'agir en casquette solaire tout en protégeant le périmètre du RDC de la pluie.

La Surface Hors-d'Oeuvre Nette (SHON) est de 225 m² et la surface habitable, de 192 m².



Figure 1 : vue sud-ouest de la Maison Z.E.N

Les pièces de vie sont orientées au sud, à l'est et à l'ouest tandis que les pièces de service, moins fréquentées (cuisine, salles d'eau, entrée, escaliers) sont disposées en face nord. La façade sud est munie de larges ouvertures vitrées afin de valoriser les apports solaires en hiver et de bénéficier du confort de la lumière naturelle. Afin de tenir compte d'un masque proche situé à l'ouest, la maison est légèrement orientée vers l'est (20°) (figure 1).

Pour limiter les surchauffes d'été, une « casquette » sud a été calculée. Pratiquement, il s'agit simplement du débord de toiture. Au solstice d'été, le 21 juin, lorsque le soleil est au zénith, la casquette ombre complète le vitrage qu'elle surplombe, tandis qu'au solstice d'hiver, à midi solaire, la fenêtre est complètement exposée à l'éclairage direct. Elle permet de stopper 60 % de l'ensoleillement sur les trois mois d'été. Toutefois, en hiver, elle laisse largement pénétrer les rayons du soleil pour réchauffer l'intérieur de la maison.

3.2. L'utilisation de matériaux naturels et performants

La maison est essentiellement constituée de bois pour les murs et la façade. Celui-ci constitue une ressource renouvelable et fixe plus de CO₂ qu'il n'en consomme : les émissions de gaz à effet de serre du

bois d'œuvre sont considérées comme négatives (500 kg éq C/tonne) si le bois est replanté, comme c'est le cas en Europe; c'est donc un puits de carbone.

3.2.1. Une structure en bois

La maison Z.E.N est construite avec une structure bois en « KLH » (Kreuz Lagen Holtz, épicea d'Autriche). Il s'agit de panneaux constitués de lamelles de bois massif contrecollées croisées avec d'excellentes propriétés mécaniques, isolantes et inertielles. Ce matériau de construction, outre le fait qu'il offre la possibilité de bâtir une maison en une journée, présente d'excellentes propriétés thermiques, une certaine inertie et absorbe l'humidité. Les 94 mm d'épaisseur du KLH, en couches croisées, renforcent donc la capacité naturelle du bois à limiter les flux de chaleur. En effet, 3,5 cm de bois équivalent à 1 cm d'isolant classique mais à plus de 35 cm de béton. Le KLH étant prédécoupé en usine, la pose complète se déroule en 10 heures.

L'utilisation de bois massif s'inscrit dans une politique de développement durable, le bois étant l'un des rares matériaux de construction renouvelable. Les forêts d'Autriche, exploitées de manière durable, fournissent la matière première pour le KLH. Ce matériau de construction a reçu un avis favorable du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment).

3.2.2. Une isolation extérieure en liège

L'isolation extérieure permet d'exploiter l'inertie thermique du bâtiment : synonyme de confort, elle limite fortement les ponts thermiques. On estime, de façon générale, qu'elle permet de diviser par 2 ou 3 les pertes de chaleur. Le surcoût apparent qu'elle présente est en réalité assez minime dans un bilan économique global.

L'isolant est du liège fabriqué à partir de l'écorce du chêne liège. Chauffé à 300 °C avec de la vapeur d'eau il s'expande et se colle avec sa propre résine. Ce processus demande très peu d'énergie grise. Au-delà d'un matériau écologique, il présente l'avantage pour une maison à ossature bois, d'être imputrescible et incombustible.

3.2.3. Le bardage en Red Cedar

Le bardage de la maison Z.E.N est en cèdre rouge, ce qui lui procure un aspect chaleureux, en habillant la maison d'un beau camaïeu ocre. Cette essence, en provenance du Canada, résiste au pourrissement et aux attaques d'insecte. Cela augmente sa durée de vie, sans avoir recours à un traitement chimique. De plus, ce bois est exempt de veines de résine, il est léger, facile à travailler et à finir. Notons que les parois ne comprennent pas de pare-vapeur ; celui-ci est en effet inutile dans la mesure où il n'existe aucun risque de condensation dans l'isolant, puisque c'est la paroi intérieure qui fait office de pare-vapeur.

3.2.4. Résistance thermique de la paroi de la maison ZEN

On a de l'intérieur (gauche) vers l'extérieur (droite) (figure 2) :

- du bois massif KLH de 94 mm d'épaisseur ;
- un isolant liège de 150 mm ;
- une lame d'air de 27 mm ;
- un bardage en Red Cedar de 19 mm.

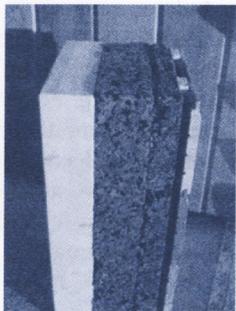


Figure 2 : maquette d'une paroi verticale de la Maison Z.E.N

La résistance thermique par unité de surface offerte par cette paroi entre les deux ambiances qu'elle sépare, est de $4,37 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, soit un coefficient de déperditions U de $0,23 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

3.3. Les ouvrants

Les pertes par les vitrages représentant 25 à 35 % des pertes totales, nous avons choisi des ouvrants à la pointe de la technologie, composés de triples vitrages peu émissifs (qui empêchent le rayonnement infrarouge du vitrage intérieur vers l'extérieur) avec lame d'argon.

Ainsi, toutes les façades de la maison Z.E.N possèdent des ouvrants munis de triples vitrages peu émissifs. Cette configuration a pour avantage de limiter au maximum les déperditions au nord, et de lutter contre les surchauffes d'été au sud.

Pour une meilleure gestion des apports solaires, leur surface est limitée au nord, mais pas leur nombre, afin de garantir un éclairage naturel suffisant dans toutes les pièces de la maison. Ainsi, toutes les salles d'eau bénéficient d'un éclairage naturel, même celles qui sont situées à l'étage, via des fenêtres de toit, elles aussi en triple vitrage.

Les cadres sont également d'excellente facture. En bois, ils comportent une isolation supplémentaire avec des rupteurs de ponts thermiques en liège. Ce qui permet d'obtenir les performances suivantes :

- ▲ $U_w = 0,86 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ (coefficient de transmission de la fenêtre),
- ▲ $g = 0,5$ (facteur solaire du vitrage, défini comme le ratio de la quantité totale d'énergie pénétrant dans le bâtiment sur l'énergie incidente reçue par le vitrage).
- ▲ $U_{\text{verre}} = 0,55 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

3.4. Les systèmes actifs

3.4.1. La ventilation

Elle est assurée mécaniquement par une double-flux thermodynamique en amont de laquelle on trouve un puits climatique (ou puits canadien/provençal).

3.4.2. Le puits climatique

Le puits canadien de la Maison Z.E.N est un tube de 20 cm de diamètre enterré à 2,50 mètres de profondeur ; en forme d'épingle, il fait 40 mètres de long. Toutes les parties enterrées sont constituées de tronçons en polyéthylène haute densité, recouvertes d'un revêtement en argent antibactérien. Les parties accessibles (entrée et sortie) sont en PVC.

Notons qu'en été, il y a risque de condensation et il est important de ne pas avoir de point bas à l'intérieur même du puits canadien : de l'eau stagnante pourrait générer des odeurs désagréables qui se retrouveraient dans la maison.

Sur le puits de la maison Z.E.N, deux points bas existent : un à l'entrée et l'autre à la sortie ; ce dernier est équipé d'une récupération des condensats.

Le puits canadien est équipé d'un by-pass constitué de deux registres motorisés qui permettent de sélectionner l'air le plus favorable en fonction de la saison : le plus chaud en hiver et le plus frais en été.

3.4.3. La double-flux thermodynamique

La pompe à chaleur de la Maison Z.E.N permet de fournir 2 kW en mode chaud et 3 kW en mode froid. Elle dispose en effet de deux compresseurs de 1 et 2 kW qui peuvent fonctionner alternativement en mode chaud et simultanément en mode froid.

La pompe à chaleur est installée au sous-sol, dans lequel arrive l'air neuf soit en provenance du puits canadien, soit directement de l'extérieur. L'air neuf est ensuite insufflé dans les différentes pièces au moyen de colonnes situées de chaque côté de la maison (à l'Est et à l'Ouest). Une puissance de 2 kW est suffisante pour couvrir la plus grande partie des besoins de chauffage, mais un complément est nécessaire dès que la température extérieure avoisine les 0°C . Ce complément est assuré par une pompe à chaleur air/eau.

3.4.4. La pompe à chaleur air/eau

Une PAC air/eau de 3kW eut été suffisante pour garantir des performances correctes. Mais il n'en existait pas sur le marché.

D'une puissance d'environ 5 kW, celle choisie fonctionne grâce à un compresseur disposant de la technologie « Inverter ». Cette technologie permet de réguler la vitesse de rotation du compresseur en fonction de la puissance à fournir. Cela permet de réaliser des économies par rapport à une solution en Tout-Ou-Rien, qui, en raison des appels de puissance au démarrage du compresseur, est bien plus gourmande en énergie. La technologie « Inverter » permet aussi de faire l'impasse sur un ballon tampon.

La PAC permet de chauffer le bâtiment au moyen d'émetteurs basse température.

La PAC air/eau permet aussi de produire de l'eau chaude sanitaire.

3.4.5. Les émetteurs de chauffage

Dans la maison Z.E.N, les émetteurs de chauffage sont constitués par des murs chauffants en allège, option préférée à celle d'un plancher chauffant en

raison d'une moindre inertie. En effet, il peut arriver que le système de chauffage soit sollicité pour des périodes de temps très courtes, en particulier pour des bâtiments bien isolés. Ceci est d'autant plus vrai pour la maison Z.E.N qu'elle est dotée d'un second système de chauffage. Pour un plancher chauffant, on devra d'abord chauffer la dalle, avant qu'un régime permanent ne s'établisse. Et, bien qu'il existe des chapes à faible inertie, le temps de mise en action est beaucoup plus lent (3-4 heures) qu'avec un mur chauffant (1/4 - 1/2 heure), dont l'épaisseur (et donc la masse) est beaucoup plus faible.

Les émetteurs sont constitués par des plaques de Fermacell de 18 mm, dans lesquels circulent des tuyaux (eau chaude à 33 °C).

3.4.6. Le photovoltaïque

L'une des spécificités de la maison ZEN est qu'elle n'échange que de l'électricité avec l'extérieur.

Ce fut un choix délibéré que de baser le système énergétique de la maison sur le vecteur électricité. Sa croissance annuelle mondiale est deux fois plus rapide que les autres formes d'énergie. Dès lors, outre le fait que l'accès à l'électricité est un facteur important du développement des pays les moins avancés, nous pensons que d'un point de vue global, ce vecteur énergétique tiendra une place prépondérante dans le bouquet énergétique du milieu du siècle. Ses applications potentielles sont en effet multiples et des synergies sont possibles entre l'habitat et le transport, deux secteurs importants au niveau de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre.

Néanmoins, compte tenu de son coût encore élevé, et ce fut l'une des préoccupations principales lors de la conception, l'objectif premier est d'utiliser rationnellement et intelligemment cette énergie.

Grâce aux efforts consentis sur la demande, nous avons pu utiliser le photovoltaïque (figure 3) comme source pour concevoir une maison qui ne consomme et ne produit que de l'électricité. Nous avons installé sur la toiture de la maison ZEN une puissance photovoltaïque de 13 kWc (7 kWc au Sud et 6 kWc au Nord) qui produit annuellement respectivement 7 000 kWh et 3 000 kWh pour un total de 10 000 kWh, correspondant aux besoins estimés de 50 kWh/m².an d'une utilisation domestique sur une surface habitable de 200 m².



Figure 3 : les modules en couches minces CIS de la Maison Z.E.N

Contrairement aux idées reçues, il n'est pas impossible d'installer des modules photovoltaïques orientés au nord. C'est tout à fait envisageable dans le cas d'une construction neuve pour laquelle les modules se substituent aux tuiles.

En outre, ce n'est pas parce qu'un module photovoltaïque est au nord qu'il ne produit pas : les simulations (et le monitoring l'a prouvé) montraient que le pan nord produirait la moitié de ce que produit le pan sud. En fondant le calcul non sur l'investissement total de l'installation, mais sur cet investissement moins l'économie réalisée sur les ardoises, on arrive à un équilibre économique acceptable.

4. Bilan

La maison a été conçue comme une maison d'habitation, mais elle abrite depuis janvier 2008 les bureaux de Cythelia (www.cythelia.fr). Les objectifs n'ont pas changé pour autant, seule la répartition entre les postes de consommation est modifiée.

La figure 4 ci-dessous présente les consommations par poste ainsi que les productions des quatre dernières années. Les consommations de 2008 sont sous-estimées puisque le monitoring complet n'est opérationnel que depuis mars 2008. On remarque qu'à l'exception de 2010, les consommations sont très proches de l'objectif des 50 kWh/m².an et que les productions sont également très proches.

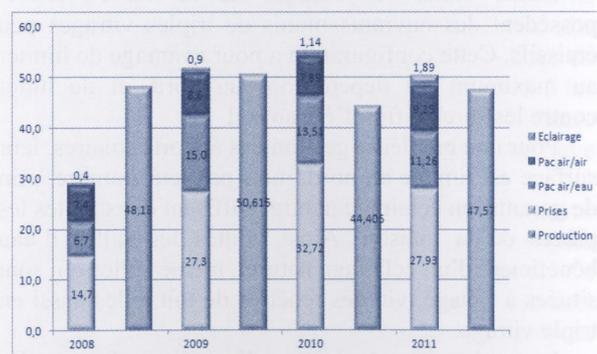


Figure 4 : consommations détaillées et productions des quatre dernières années.

On remarque, entre 2009 et 2010, que des consommations plus importantes d'électricité spécifique (« prises ») se traduisent par des besoins de chauffage moins importants (les deux PAC), en raison d'apports internes plus importants. L'augmentation des consommations d'électricité spécifique entre 2008 et 2010 s'explique par le passage du nombre d'occupants de 5 à 12. La diminution observée en 2011 s'explique en partie par une réorganisation du temps de travail, au renouvellement du matériel informatique, et, osons-nous l'espérer, à un comportement plus sobre !

La Figure 5 illustre particulièrement bien le déphasage semestriel existant entre consommations et production pour l'année 2011.

La Figure 6 détaille ces mêmes consommations poste par poste. Elles sont relativement faibles. Attention, les consommations d'éclairage sont surestimées, puisqu'elles prennent en compte la consommation d'un

ventilateur destiné à ventiler les modules photovoltaïques et c'est pourquoi les consommations de ce poste sont plus élevées l'été.

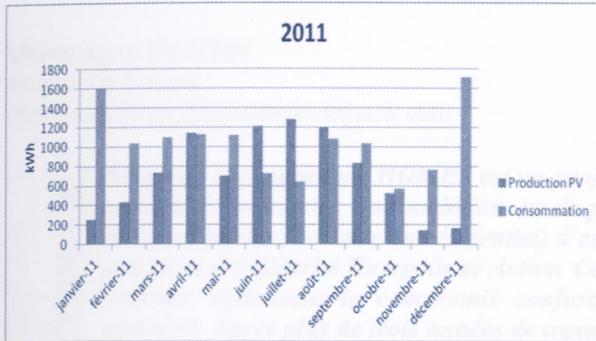


Figure 5 : consommations et productions mois par mois (2011)

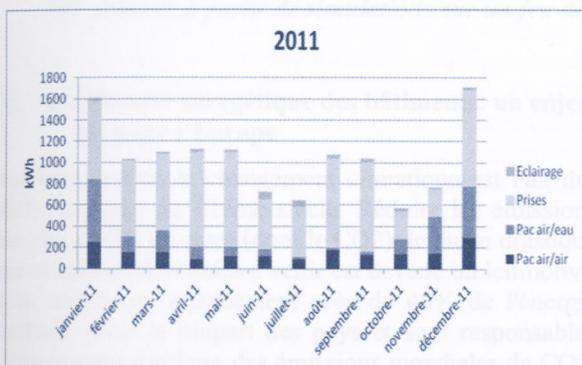


Figure 6 : consommations détaillées mois par mois (2011)

Des observations intéressantes ont pu être faites concernant l'installation photovoltaïque, notamment concernant la dégradation des modules.

La technologie CIS mise en œuvre, comme certaines autres couches minces encapsulées dans un verre sodo-calcique, nécessite une mise à la terre de la polarité négative. Or, cette spécificité n'est connue que depuis début 2010 et la correction n'a été apportée qu'au printemps 2010. Entre-temps, le suivi de production a permis de mettre en évidence la dégradation des modules par le ratio de performance (figure 7): les productions n'étaient plus à la hauteur de ce qui était attendu étant donnée l'irradiation solaire; depuis la mise à la terre, la dégradation s'est stabilisée.

Les modules ont été échangés gracieusement en mars 2012 au titre de la garantie, et l'impact sur le ratio de performance est immédiatement visible.

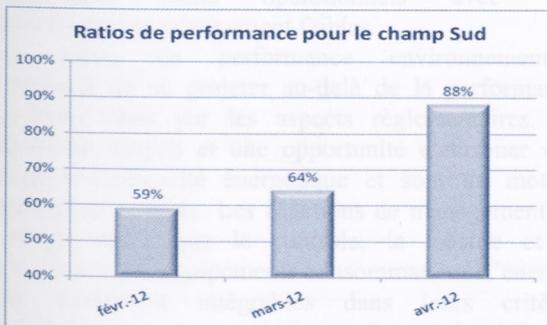


Figure 7 : ratios de performance pour le champ Sud sur la période février à avril 2012

5. Les suites du projet

Nous l'avons vu, le nombre d'occupants de la Maison Z.E.N a considérablement augmenté. C'est une des raisons pour lesquelles nous avons construit un deuxième bâtiment, plus petit, à proximité immédiate.

La Petite Maison ZEN (PMZ) (figure 8) est toujours un bâtiment à énergie positive, en ossature bois, et est équipée d'un système de chauffage/rafraîchissement/ECS utilisant le couplage entre toiture photovoltaïque (en couches minces CIGS) et pompe à chaleur. Cette idée de couplage thermique avait été initiée sur la Maison Z.E.N, pour laquelle l'évaporateur de la PAC air/eau est placé au grenier, permettant une ventilation des modules PV et une augmentation de la température de source froide.

Pour la PMZ, un prototype a été développé dans le cadre du programme de recherche PACAirPV financé par l'ANR et devrait déboucher sur la commercialisation du système AEDOMIA, en partenariat avec un industriel.

AEDOMIA est un produit de couverture du bâtiment multifonctions. Ce système énergétique multifonctionnel permet de valoriser la toiture photovoltaïque et d'en faire un élément actif de la construction. Il satisfait 5 besoins : couverture, production d'électricité, de chaud, de froid (en été, le système fonctionne la nuit) et d'eau chaude sanitaire. La toiture devient ainsi un élément clef du confort dans le bâtiment. Principaux avantages :

- ▲ les modules PV sont mieux ventilés et leur production et durée de vie sont augmentées,
- ▲ le coefficient de performance (COP) de la PAC est amélioré,
- ▲ le système permet de déphaser production et consommation. La production est réalisée aux moments les plus favorables.



Figure 8 : au premier plan, la Petite Maison ZEN, en arrière plan, la Maison Z.E.N

En attendant que les bâtiments à énergie positive ne deviennent obligatoires en 2020, un label similaire au label BBC-Effinergie est en cours d'élaboration, et devrait inciter les maîtres d'ouvrage à en construire dès 2013.

6. Références

« Construire un bâtiment à énergie positive », Alain Ricaud et Ismaël Lokhat, Editions Dunod, 2010.