

Comparaison de différents systèmes énergétiques pour une maison basse consommation

Françoise Evin, Pierre-Henri Milleville, Emmanuelle Cayre, Stanislas Nosperger ¹

¹ EDF R&D. – Centre des Renardières

Ecuelles, 77818 Moret sur Loing Cedex

francoise.evin@edf.fr, pierre-henri.milleville@edf.fr, emmanuelle.cayre@edf.fr

stanislas.nosperger@edf.fr

RESUME. Différentes solutions conduisant à des consommations d'énergie primaire inférieures au seuil du label BBC (Bâtiment basse consommation) sont comparées entre elles pour une maison de 115 m² représentative des maisons neuves françaises. La construction est de type traditionnel (parpaing + doublage intérieur polystyrène ou polyuréthane). Le chauffage est assuré par une pompe à chaleur air/eau, eau/eau ou air/air, par effet Joule ou par une chaudière gaz à condensation ou une chaudière à granulés de bois. Pour la production d'eau chaude sanitaire, les solutions retenues sont les chauffe-eau solaires individuels électriques ou gaz et les chauffe-eau thermodynamiques. Les solutions sont comparées entre elles suivant les critères : consommations énergétiques en énergie primaire, émissions de CO₂, consommations en énergie finale, coûts d'énergie et d'investissement des différentes solutions. Nous montrons que les pompes à chaleur pour le chauffage et les chauffe-eau thermodynamiques offrent les meilleurs compromis énergie / investissement / émissions de CO₂.

MOTS-CLÉS : Maison basse consommation, pompe à chaleur, étude technico-économique, émissions de CO₂.

ABSTRACT. Different solutions giving primary energy consumption under the French label BBC (low energy building) are compared for a 115 m² house, typical of new built French houses. The building type is traditional (breeze block + internal insulation with polystyrene or polyurethane). Space heating is provided by a heat pump (air to water, water to water or air to air), by Joule effect, by a condensing gas boiler or a wood pellet boiler. Domestic hot water production is done by solar water heaters or thermodynamic ones. The solutions are compared according different criteria: primary energy consumption, CO₂ emissions, final energy consumption, energy costs and investment costs. We show that the heat pumps for heating and hot water production offer the best compromise energy / investment / CO₂ emissions..

KEYWORDS : low energy building , heat pump, economical study, CO₂ emissions.

1. INTRODUCTION

Le secteur des bâtiments mobilise 43% de la consommation énergétique finale française (en 2006) et produit 25% des émissions de CO₂ liées à la combustion d'énergie. Un objectif prioritaire est donc de réduire les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre des bâtiments. Le problème se pose de manière différente pour les bâtiments neufs et pour les bâtiments existants. L'étude présentée ici a pour but de comparer entre elles, sous les angles des coûts d'énergie, d'investissement et des émissions de CO₂, différentes façons de réaliser une maison neuve répondant au label Bâtiment Basse Consommation (BBC) et particulièrement de positionner les solutions avec une pompe à chaleur.

2. METHODE

La démarche consiste à sélectionner des combinaisons de technologies d'isolation et systèmes (de chauffage, production d'eau chaude et ventilation) compatibles avec le label français BBC 2005, puis à calculer la facture énergétique grâce à une modélisation avec l'outil dynamique CA-SIS (Tabary *et al.*, 1997) pour réaliser une comparaison des solutions en coût global. Cette étude est basée sur une maison individuelle de 115 m² habitables (dénommée MI3) très représentative de la taille des maisons neuves construites en France. Pour les besoins de cette étude, elle est supposée être située en zone climatique H1.

2.1. LES OUTILS DE CALCUL

Le seuil BBC correspond à une consommation d'énergie primaire conventionnelle pour le chauffage, l'eau chaude, le rafraîchissement, la ventilation et l'éclairage de 50 kWhep/(m².an), affecté d'une pondération selon la situation géographique, dans la zone H1 (nord, est et centre de la France) le seuil est relevé à 65 kWhep/(m².an), tandis qu'il est de 40 kWhep/(m².an) en zone H3 (sud de la France).

La vérification de la conformité de la consommation d'énergie primaire (CEP) au label BBC doit être effectuée avec un outil de calcul réglementaire contenant le cœur de calcul Th-CE2005 développé par le CSTB. Nous utilisons l'outil de calcul de la société Logiciels Perrenoud pour sélectionner les solutions conformes au label BBC et pour calculer les émissions de CO₂. Le calcul des consommations et factures énergétiques est effectué avec l'outil CA-SIS développé par EDF sur la base du cœur du calcul TRNSYS.

2.2. DESCRIPTION DU BATIMENT

La maison modélisée est la maison individuelle MI3 disponible dans la bibliothèque des bâtiments types du logiciel CA-SIS version 3.0. Sa technique de construction est traditionnelle (parpaings + isolation intérieure).

C'est une maison de type T5, d'une surface habitable de 115,6 m², constituée d'un rez-de-chaussée et d'un étage. La surface hors œuvre nette (SHON) est de 142,5 m².

Elle est construite sur un vide sanitaire et possède un garage accolé.

Deux zones sont définies : une zone « jour » (59,7 m²), et une zone « nuit » (55,9 m²).

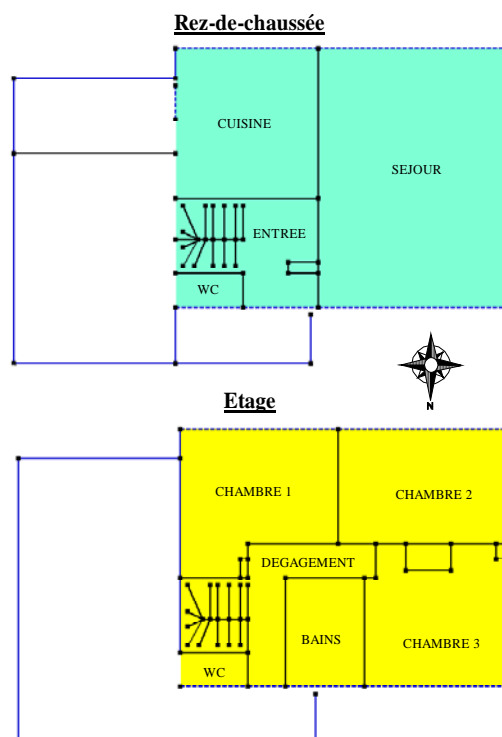


Figure 1 : Plan de la maison MI3 de 115 m²

La technique constructive a été volontairement choisie traditionnelle, pour la version 1 de base :

- murs extérieurs en parpaing de 20 cm avec un doublage en polystyrène expansé Th32 : $U = 0,282 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$,
- portes-fenêtres et fenêtres avec fermetures (par volets battants en bois) en double vitrage 4/16/4 et menuiseries PVC : $U_w = 1,7 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, $U_{jn} = 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, $FS = 0,42$,
- porte d'entrée et de garage : $U_w = 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$,
- la toiture est isolée grâce à une épaisseur de 26 cm de laine minérale dont la conductivité est de $0,035 \text{ W}/(\text{m}.\text{K})$.

Le coefficient de transmission thermique U_{bat} global de cette maison MI3 est de $0,388 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, soit 26 % de moins que la référence de la RT2005 U_{bat} ref.

La perméabilité à l'air a été fixée à $0,8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$.

Une version 2, plus isolée, du même bâtiment a été modélisée, sans changer de technique constructive mais en choisissant de meilleurs matériaux : le doublage des parois est réalisé en polyuréthane (PUR) dont la conductivité est de $0,023 \text{ W}/(\text{m}.\text{K})$, la toiture est isolée par 300 mm de laine minérale de conductivité = $0,032 \text{ W}/(\text{m}.\text{K})$. Le coefficient U_{bat} global pour cette solution améliorée vaut $0,292 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, soit 44 % de moins que la référence RT2005 U_{bat} ref. La perméabilité à l'air dans cette version plus isolée a été fixée à $0,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$.

Dans cette étude, le bâtiment n'est équipé d'une installation de production d'électricité photovoltaïque que pour une seule des variantes, c'est grâce aux performances de l'isolation et des systèmes que la maison atteindra le seuil BBC pour les autres variantes.

Les équipements d'éclairage, les scénarios d'usage et de besoins sont choisis conformes aux conventions de la méthode de calcul Th-CE (CSTB, 2006).

2.3. SYSTEMES POUR LE CHAUFFAGE, L'EAU CHAUDE SANITAIRE ET LA VENTILATION

La maison est équipée de systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire (ECS) performants : pompe à chaleur (PAC) ou chaudière à haut rendement associée à un plancher chauffant basse température au rez-de-chaussée et des ventilo-convecteurs ou radiateurs à l'étage, sauf pour le cas de la PAC air/air. Ces systèmes fonctionnent à basse température afin d'assurer la meilleure performance des générateurs. Le tableau 1 indique les performances des systèmes étudiés.

Les performances des PAC retenues sont issues du site internet de PROMOTELEC, soit, pour la PAC air/eau standard un COP nominal de 3,4 (et 2,4 à Text de -7°C), et pour les autres PAC, plus performantes, un COP nominal supérieur à 4 pour les différentes versions air/eau, eau/eau et air/air.

Les chaudières retenues ont un rendement (nominal) de 96,8 % (sur PCI) pour la chaudière gaz à condensation et de 88 % pour la chaudière à granulés de bois (selon des catalogues de constructeurs).

L'eau chaude est produite avec des systèmes performants : Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI) avec appoint électrique ou gaz ou chauffe-eau thermodynamique. Leurs caractéristiques sont issues des avis techniques et des documentations des constructeurs.

Ventilation : les calculs « réglementaires » pour les solutions avec ventilation double-flux sont plus pénalisants qu'avec les solutions de ventilation simple-flux hygro-réglable. Toute l'étude a donc été effectuée avec une ventilation hygro-réglable B.

Nom	Type de système	Caractéristiques et performances
PACRO	PAC air extérieur/ eau	COP à +7°C/35°C = 3,4 - COP à -7°C/35°C = 2,4
MPACRO	PAC air extérieur/ eau	COP à +7°C/35°C= 4,1 - COP à -7°C/35°C = 2,24
PACOO	PAC eau/eau (capteur enterré)	COP = 4,5 à 10°C/35°C
EJoule	Chauffage Effet joule convecteurs	Rendement = 1
MPACRR	PAC air extérieur/air	COP à +7°C/20°C = 4,8 - COP à -7°C/20°C = 3,4
CESI	CESI électrique	Ballon 300 l - Capteur 4 m ² rendement $\eta = 0,72$
MCESI	CESI électrique très performant	Ballon 300 l - Capteur 4 m ² , η max = 0.82
MChGAZ	Chaudière gaz condensation	rendt à Pn = 96,8% sur PCI, à 30% de Pn = 110 %
MChBOIS	Chaudière à granulés de bois	η à Pn = 88%
CESIG	CESI gaz	Ballon 300 l - Capteur 4 m ² , rendement $\eta = 0,72$
ECS thermo	ECS thermodynamique	Ballon 200 l – COP annuel = 2,6

Tableau 1 : Caractéristiques des systèmes de chauffage et production d'ECS choisis

3. RESULTATS

3.1. SOLUTIONS CONFORMES AU LABEL BBC

Les premières études réglementaires effectuées pour la maison MI3 située en région parisienne, ont rapidement montré que les solutions de chauffage et la production d'ECS par effet Joule donnent, pour ce bâtiment, une CEP incompatible avec l'exigence du label BBC sans installer de panneaux photovoltaïques. A l'issue d'une étude paramétrique, 8 combinaisons de bâti et de systèmes performants ont été retenues pour la suite :

1. PACOO CESI	Bâti performant 1 (Ubat = 0,388 W/(m ² .K))	Plancher chauffant, PAC eau/eau (PACOO)	Meilleur CESI électrique (MCESI),
2. MPACRR CESI	Bâti performant 1 (Ubat = 0,388 W/(m ² .K))	Meilleure PAC air/air (MPACRR)	CESI électrique standard
3. PACRO MCESI	Bâti performant 1 (Ubat = 0,388 W/(m ² .K))	Plancher chauffant, PAC standard air/eau (PACRO)	Meilleur CESI électrique (MCESI)
4. PACRO ECSTh	Bâti performant 1 (Ubat = 0,388 W/(m ² .K))	Plancher chauffant, PAC air/eau standard	Production d'ECS thermodynamique *
5. MBâti PACRO CESI	Bâti très performant 2 (Ubat = 0,292 soit Ubat ref-44%)	Plancher chauffant, PAC standard air/eau (PACRO)	CESI électrique standard
6. EJoule PV MCESI	Bâti très performant 2 (Ubat = 0,292 soit Ubat ref-44%)	Effet Joule convecteurs	Meilleur CESI électrique + 14 m ² PV
7. MChGAZ CESIG	Bâti performant 1 (Ubat=0,388 W/(m ² .K))	Plancher chauffant chaudière gaz à condensation (MChGAZ)	CESI gaz standard (CESIG).
8. MChBOIS CESI	Bâti performant 1 (Ubat=0,388 W/(m ² .K))	Plancher chauffant, meilleure chaudière bois (MChBOIS)	CESI électrique standard

Tableau 2 : Les 8 combinaisons étudiées

* NB : La consommation d'énergie de l'ECS avec un système de production thermodynamique, non disponible actuellement dans le calcul réglementaire, fait l'objet d'un calcul a posteriori sur la

base de la consommation d'ECS par effet Joule divisée par le COP choisi de 2,6. Cette solution de production d'ECS est légèrement plus performante que le CESI électrique.

Le projet de bâtiment MI3, équipé des huit solutions sélectionnées répond à l'exigence du label BBC. La consommation d'énergie primaire par usage est présentée sur la figure n°2. On a choisi selon les cas, soit les matériels standard du marché soit les meilleures solutions disponibles lorsque nécessaire pour atteindre le label. La solution la plus performante est celle qui associe le meilleur bâti à Ubat= 0,292 à une PAC air/eau standard et un CESI à appoint électrique. On observe, dans la plupart des cas, que la consommation due à l'ECS est du même ordre de grandeur que celle du chauffage.

Le projet ne comporte pas de refroidissement mais le calcul réglementaire impose de le prendre en compte si le système est réversible, ce qui est le cas de la PAC air-air, c'est pourquoi la solution n°2 comporte un poste refroidissement et demeure malgré tout, éligible au label BBC.

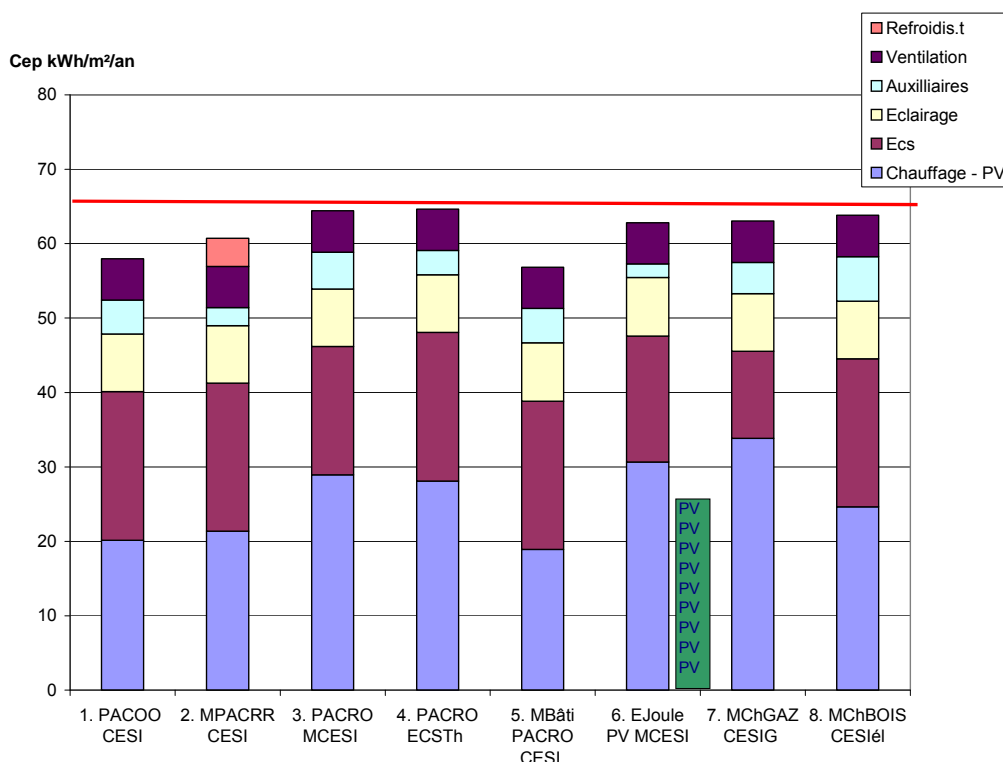


Figure 2 : Consommation annuelle d'énergie primaire des différentes solutions, calcul réglementaire par m² SHON. Les notations sont celles du tableau n°1.

3.2. EMISSIONS DE CO₂

Les émissions de CO₂ dues aux usages énergétiques de la maison sont calculées avec l'outil de calcul réglementaire en tenant compte des valeurs d'équivalence actuellement en vigueur (d'après l'arrêté DPE) : 180 g/kWh électrique en chauffage et 40 g pour l'ECS, 234 g/kWh gaz et 13 g/kWh bois. L'installation de PV n'est pas considérée comme réduisant les émissions de CO₂.

La figure 3 présente les émissions de CO₂ : seuls les systèmes utilisant une pompe à chaleur ou une chaudière à bois permettent de réduire significativement les émissions de CO₂ à moins de 3 kg/m²/an. La solution effet Joule + CESI émet 4,9 kg de CO₂ m²/an soit 2,3 fois moins que la solution gaz qui émet 11,4 kg/m²/an .

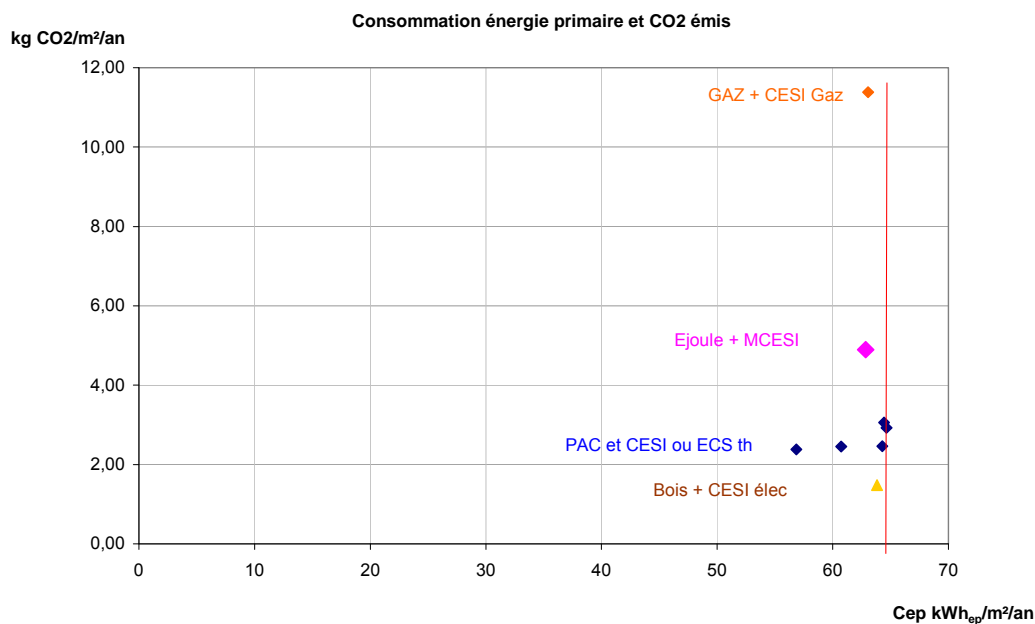


Figure 3 : Emissions de CO₂ en kg par m² (SHON) et par an et consommation d'énergie primaire des trois familles de solutions : bois, PAC et gaz.

3.3. COUT D'EXPLOITATION

Le logiciel CA-SIS est utilisé pour calculer la facture énergétique annuelle. Les consommations simulées par CA-SIS (S2T, 2007) peuvent être sensiblement différentes de celles obtenues avec un outil réglementaire, en raison de la différence d'objectif et de méthode : le premier outil étant dédié à reconstruire au plus près les consommations par usage, le second à vérifier une conformité réglementaire ; par exemple la consommation d'énergie primaire calculée par CA-SIS est de 116 kWh_{ep}/m²/an pour la solution bois et solaire n°8 comparé à 63,8 pour le calcul réglementaire.

Le coût énergétique annuel est estimé sur la base des tarifs gaz (tarif B1) et électricité (tarif bleu heures creuses) de mi-2006 et sur un prix de 4,3 c€/kWh pour les granulés de bois. Le coût d'exploitation sur 10 ans est calculé en ajoutant le coût de maintenance des systèmes, à coût d'énergie et d'entretien constants. La solution la moins coûteuse en exploitation est la solution n°4 (PAC air-air très performante et CESI), rappelons que la PAC choisie avait un COP très élevé de 4,8 à +7°C. Pour le PV le tarif actuel de rachat du PV intégré de 55 c€/kWh est appliqué.

3.4. COUTS D'INVESTISSEMENT

Le coût d'investissement, hors aides financières (figure 4) prend en compte les travaux du bâti liés aux performances thermiques (isolants, fenêtres), le coût posé des systèmes de chauffage (y compris le plancher), de ventilation et d'ECS. Il a été estimé par EDF R&D en choisissant des solutions disponibles en France. Les solutions PAC air/air et chaudière gaz + solaire sont les moins coûteuses.

3.5. COUT GLOBAL

Le coût global calculé sur 10 ans intègre l'investissement non actualisé, sans les aides et crédits d'impôt, l'énergie et la maintenance, la revente d'énergie produite par le PV (voir tableau 3). On observe sur la figure n°5 (coût global sur 10 ans) que la solution la plus intéressante sur ce critère est

la solution n°2 PAC air/air et solaire, suivie par les solutions n°7 gaz et solaire et n°4 PAC air/eau et eau chaude thermodynamique. La comparaison des solutions n°3 et 4 met en évidence l'intérêt économique de l'ECS thermodynamique. Une solution PAC air/air et chauffe-eau thermodynamique qui n'a pas été envisagée au début de l'étude, serait encore plus intéressante.

Le même calcul a été effectué sur 35 ans intégrant un remplacement des systèmes de chauffage, ventilation et ECS au bout de 20 ans : la solution n°5 meilleur bâti et PAC air/eau devient plus performante que la solution n°8 bois, l'ordre de classement des autres solutions PAC et chaudières reste globalement le même. La solution n°6 Effet Joule + PV devient la moins coûteuse du fait du prix de rachat actuel du kWh qui a été appliqué sur 35 ans.

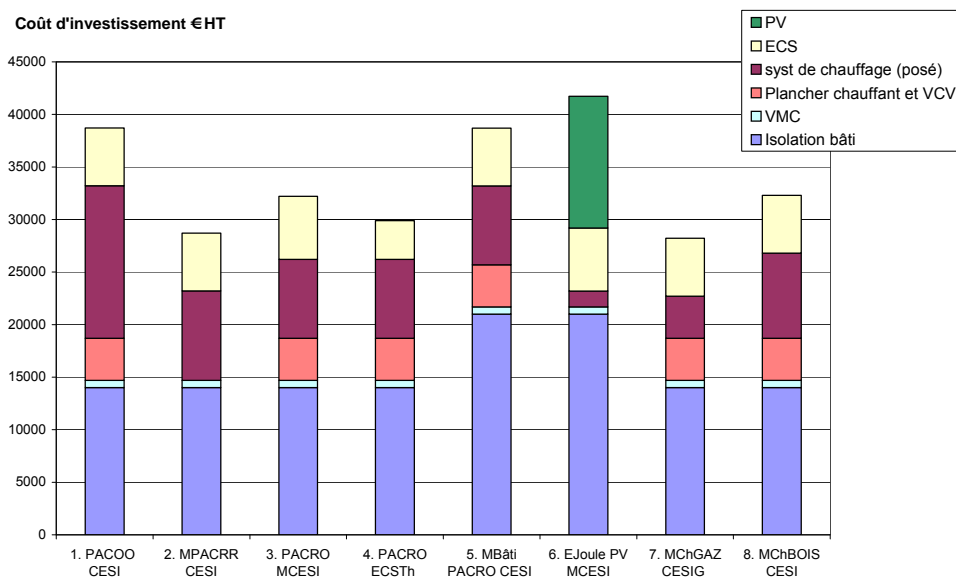


Figure 4 : Coût d'investissement des différentes solutions énergétiques : isolation, fenêtres, ventilation, chauffage et ECS (hors aides en Euros hors taxes)

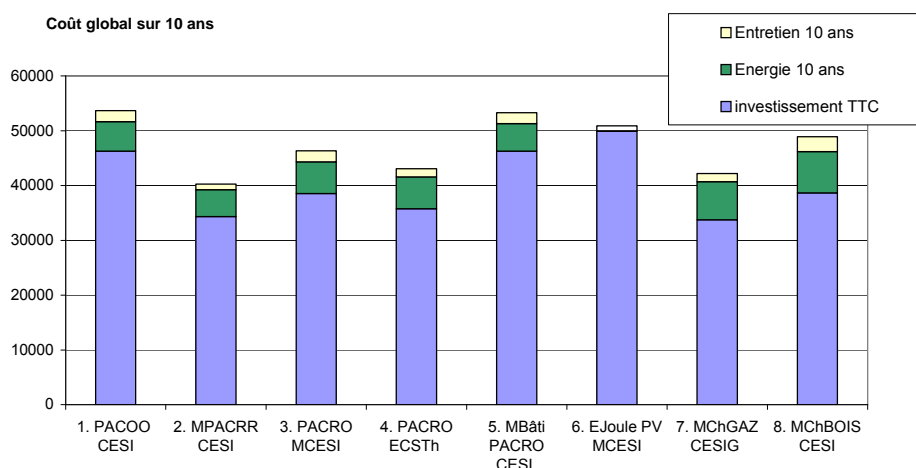


Figure 5 : Coût global en € TTC sur 10 ans (investissement, énergie et exploitation)

	Energie finale kWh/an (Ca-Sis)	Coût énergie + entretien par an € TTC	Investissement € TTC	Coût global annualisé sur 10 ans en € TTC	Coût global annualisé sur 35 ans en € TTC	CEP conventionnelle	CO2 émis Kg/m ² /an
1. PACOO CESI	3990	737	46285	5366	2767	64,3	2,46
2. MPACRR CESI	3534	590	34325	4023	2073	60,7	2,46
3. PACRO MCESI	4472	781	38510	4632	2367	64,4	3,06
4. PACRO ECSTh	4247	731	35760	4307	2159	64,6	2,93
5. MBâti PACRO CESI	3605	703	46270	5330	2493	56,8	2,38
6. EJoule PV MCESI	7024 sans PV	-38 avec PV	49890	4951 avec PV	1667 avec PV	62,8	4,89
7. MChGAZ CESIG	10987	845	33730	4218	2157	63,0	11,38
8. MChBOIS CESI	12797	1026	38630	4889	2618	63,8	1,48

Tableau 3 : Synthèse des données économiques et résultats

4. CONCLUSION

La comparaison des solutions énergétiques pour une maison traditionnelle conforme au label BBC montre que les pompes à chaleur associées à de l'ECS solaire ou thermodynamique présentent un net avantage sur les plans émissions de CO₂ et coût énergétique annuel. Leur coût d'investissement pénalise le coût global des solutions avec PAC géothermales, bâti très isolé et chaudière à bois et avantage les chaudières à gaz, les pompes à chaleur air/air et l'ECS thermodynamique. Le chauffage par effet Joule, performant en émissions de CO₂, n'est envisageable qu'avec un excellent bâti et une production d'électricité photovoltaïque pour compenser une consommation élevée d'énergie primaire. Cette étude permet aussi de mettre en avant quelques pistes de R&D technologique à développer pour aboutir à la maison basse consommation peu coûteuse : PAC air/eau et air/air de petite puissance thermique avec un excellent COP (COP nominal supérieur à 4), ECS thermodynamique de COP supérieur à 2,6, CESI à haut rendement et coût modéré. Finalement, nous montrons que les pompes à chaleur pour le chauffage et les chauffe-eau thermodynamiques offrent les meilleurs compromis énergie / investissement / émissions de CO₂.

5. BIBLIOGRAPHIE

CSTB (2006). Méthode de calcul Th-CE, annexe à l'arrêté du 19 juillet 2006.

S2T (2007). Réalisation d'une étude paramétrique sur des assemblages bâti / équipements éligibles au futur label BBC 2005. Rapport interne.

TABARY L., DABRETEAU V. (1997). CA-SIS Software: a design tool for thermal studies with a gradual access. IBPSA 1997.