



Rapport d'étude

Simulations dynamiques de maisons à énergie positive (E+) avec
le logiciel TRNSYS 17

Projet VallEnergie - Action 3

Recherche de nouveaux concepts en énergies renouvelables : les maisons E+

Auteurs* :

Pauline Abrahams

Philippe André

Corinne Rogiest

*Contacts :

Tel. : +32 63 230 982 ;

E-mail : pabrahams@ulg.ac.be (P. Abrahams),

p.andre@ulg.ac.be (P. André).



Les partenaires du projet



Au Pays de l'Attert asbl (B) – porteur du projet

L'asbl Au Pays de l'Attert a pour objet toutes activités se rapportant directement ou indirectement au développement de la commune d'Attert, et plus globalement de la vallée de l'Attert. Ces principaux domaines d'actions sont la conservation de la nature, la sensibilisation à l'environnement et les énergies renouvelables, la culture, l'agriculture, le tourisme et la formation.



Rëidener Energiatelier asbl (L)

L'association Rëidener Energiatelier est une agence de l'énergie locale pour le canton de Redange du Grand-Duché de Luxembourg. Elle met en œuvre les politiques communales dans le domaine de l'utilisation rationnelle de l'énergie et de la promotion des énergies renouvelables. Elle assure donc un service de conseils en économie d'énergie pour les ménages privés, les PME et les communes du Canton de Redange.



D'millen asbl (L)

L'asbl D'millen, située à Beckerich au Grand-Duché du Luxembourg, est une association dont l'objectif est de développer la culture et le tourisme par l'intermédiaire d'activités diverses (conférences, séminaires, expositions...) et de sensibiliser la population locale, régionale et extérieure au développement durable.



Université de Liège – Campus d'Arlon (B)

L'unité de recherche BEMS (Building Energy Monitoring and Simulation) fait partie de l'Université de Liège – Campus Arlon et est intégrée dans le département des sciences et gestion de l'environnement. Cette unité regroupe des chercheurs autour de la thématique de l'énergétique des bâtiments. Celle-ci est abordée de deux manières : la réalisation de mesure en bâtiment-laboratoire ou sur site et la simulation numérique. L'équipe est active dans les domaines suivants : utilisation rationnelle de l'énergie dans les bâtiments, énergies renouvelables, relation énergie-environnement.

Projet soutenu par :



Projet cofinancé par l'Union Européenne
via le FEDER dans le cadre du
programme INTERREG IV A

L'Union Européenne investit dans votre avenir.



Wallonie



Syndicat Intercommunal
"De Rëidener Kanton"



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Économie

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| LISTE DES ABRÉVIATIONS | 1 |
| TABLE DES ILLUSTRATIONS ET TABLEAUX | 2 |
| CONTEXTE | 6 |
| PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE | 7 |
| ÉTAT DE L'ART | 8 |
| LA DIRECTIVE EUROPÉENNE 2010/31/UE – PEB « RECAST »..... | 8 |
| DÉFINITION DES NZEB ET NZEB | 9 |
| MAISON À ÉNERGIE POSITIVE – PROJET VALLENERGIE | 11 |
| LES PROJETS DE MAISONS VALLENERGIE | 13 |
| BELGIQUE – MODÈLES A ET B..... | 13 |
| GRAND-DUCHÉ DU LUXEMBOURG – MODÈLES C ET D | 13 |
| HYPOTHÈSES DE TRAVAIL | 15 |
| CLIMAT..... | 15 |
| PROFIL D'OCCUPATION | 15 |
| RÉGULATION DE LA TEMPÉRATURE DE CONSIGNE..... | 16 |
| PÉRIODE DE CHAUFFAGE | 16 |
| CONTRÔLES DES PROTECTIONS SOLAIRES | 17 |
| VENTILATION NOCTURNE..... | 17 |
| ÉVALUATION DE LA SURCHAUFFE ET DE LA SOUS-CHAUFFE..... | 17 |
| GAINS INTERNES | 18 |
| <i>Les occupants</i> | 18 |
| <i>L'éclairage</i> | 20 |
| <i>L'électroménager</i> | 21 |
| <i>Table des gains internes encodés</i> | 22 |
| TAUX D'INFILTRATION | 24 |
| VENTILATION | 25 |
| <i>Ventilation : législations belges et luxembourgeoises</i> | 26 |
| <i>Ventilation : méthode de calcul des débits</i> | 26 |
| <i>Ventilation : calculs des consommations électriques</i> | 31 |
| CRITÈRES : MAISON E+..... | 32 |
| <i>Critère énergétique</i> | 32 |
| <i>Critère écologique</i> | 32 |
| <i>Critère économique</i> | 33 |
| MODÈLE DE SIMULATION : MAISON A | 34 |
| MODÈLE DE SIMULATION : MAISON B | 38 |
| MODÈLE DE SIMULATION : MAISON C | 42 |
| MODÈLE DE SIMULATION : MAISON D | 46 |
| ETUDE DE L'ENVELOPPE | 49 |
| VALEURS MAXIMALES DE COEFFICIENTS U SELON LA NORME PEB | 49 |
| VARIATION DE L'ÉPAISSEUR D'ISOLATION ET DÉTERMINATION DE L'ÉPAISSEUR MINIMALE D'ISOLATION POUR ATTEINDRE LE CRITÈRE PASSIF | 51 |
| VARIATION DE L'ORIENTATION..... | 54 |

| | |
|--|------------|
| VARIATION DU FACTEUR SOLAIRE G..... | 56 |
| IMPACT DES PROTECTIONS SOLAIRES ET DE LA VENTILATION NOCTURNE | 57 |
| ETUDE DES SYSTÈMES : SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE..... | 60 |
| ETUDE DES SYSTÈMES : EAU CHAUDE SANITAIRE (ECS) | 64 |
| VARIANTES DE SIMULATIONS..... | 64 |
| COMPARAISON DES SYSTÈMES ECS | 64 |
| ETUDE DES SYSTÈMES : PRODUCTION DE CHAUFFAGE | 66 |
| VARIANTES DE SIMULATIONS : CHOIX DES SCÉNARIOS..... | 66 |
| CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE | 67 |
| <i>Description du système.....</i> | 67 |
| <i>Résultats de simulation – V1a</i> | 68 |
| <i>Résultats de simulation – V1b</i> | 71 |
| <i>Résultats de simulation – V1c.....</i> | 74 |
| <i>Bilan : chauffage électrique.....</i> | 76 |
| POÊLE À PELLETS..... | 77 |
| <i>Description du système.....</i> | 77 |
| <i>Résultats de simulation – V2a</i> | 78 |
| <i>Résultats de simulation – V2b</i> | 81 |
| <i>Résultats de simulation – V2c.....</i> | 84 |
| <i>Résultats de simulation – V2d</i> | 87 |
| <i>Bilan : poêle à pellets.....</i> | 90 |
| CHAUFFAGE PAR AIR CHAUD PULSÉ VIA LA VMC | 93 |
| POMPE À CHALEUR ET ÉMISSION PAR RADIATEURS | 96 |
| <i>Résultat de simulation – V4a.....</i> | 97 |
| <i>Résultat de simulation – V4b.....</i> | 100 |
| SYNTHÈSE..... | 103 |
| BILAN ANNUEL EN ÉNERGIE PRIMAIRE [kWh _{ep} /AN] – COMPARAISON DES SYSTÈMES..... | 103 |
| BILAN : CRITÈRE ÉNERGÉTIQUE MAISON E+ PAR SYSTÈME..... | 104 |
| BILAN ANNUEL DES ÉMISSIONS DE CO ₂ [KG/AN] – COMPARAISON DES SYSTÈMES | 105 |
| BILAN ANNUEL DU COÛT DE L'ÉNERGIE [€/AN] – COMPARAISON DES SYSTÈMES (FIGURE 50) :..... | 106 |
| ANALYSE DU CONFORT : DEGRÉS-HEURES DE SOUS-CHAUFFE (<20 °C) | 106 |
| CONCLUSIONS..... | 107 |
| ANNEXES..... | 109 |
| RÉFÉRENCES | 111 |

Liste des abréviations

CDC : Cahier des charges

ECS : Eau chaude sanitaire

EnR : Énergies renouvelables

EPS : Polystyrène expansé

GES : Gaz à effet de serre

IEA : International Energy Agency

Maison E+ : maison à énergie positive

n50 : Taux d'infiltration pour une différence de 50 Pascals entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment

nZEB: Nearly zero energy building

NZEB: Net Zero Energy Building

PAC : Pompe à chaleur

PEB : Performance énergétique des bâtiments

PS : Protections solaires

PV : Photovoltaïque

RT2012 : Réglementation thermique française

RW : Région wallonne

TRNSYS : TRaNsient SYstems Simulation Program

UE : Union européenne

VN : Ventilation nocturne

VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée

Table des illustrations et tableaux

Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. Vallée de l'Attert belgo-luxembourgeoise | 6 |
| Figure 2. Critères de certification de la maison passive applicables en Région wallonne [7] | 12 |
| Figure 3. Recommandations du PHPP pour atteindre les exigences du passif [7] | 12 |
| Figure 4. Carte: distance St-Hubert / Attert: 60 km (Google Map™) | 15 |
| Figure 5. Table des taux métaboliques en fonction des activités – issue de l'EESTI STANDARD EVS-EN ISO 7730:2006[15]..... | 18 |
| Figure 6. Exemple de profils d'occupation dans la zone « séjour » | 19 |
| Figure 7. Consommation électrique mensuelle pour l'éclairage, par zone et en fonction du mois de l'année - modèle A. | 20 |
| Figure 8. Température moyenne dans la maison A au cours de l'année (rouge) et nombre d'heures de surchauffe (bleue ; température moyenne supérieure à 25 °C) – modèle A avec gains internes et hypothèses par défaut..... | 23 |
| Figure 9. Température moyenne dans la maison A au cours de l'année (rouge) et nombre d'heures de surchauffe (bleue ; température moyenne supérieure à 25 °C) – modèle A sans gain interne et hypothèses par défaut..... | 23 |
| Figure 10. Schéma d'une ventilation mécanique double flux avec by-pass..... | 25 |
| Figure 11. Légende des critères de performance énergétique des maisons | 32 |
| Figure 12. Valeurs des émissions de gaz à effet de serre pour différents types de constructions (France) | 32 |
| Figure 13. Plans d'architecte et zonage - Modèle A..... | 36 |
| Figure 14. Plans d'architecte et zonage - Modèle B..... | 40 |
| Figure 15. Plans d'architecte et zonage - Modèle C..... | 44 |
| Figure 16. Plans d'architecte et zonage - Modèle D..... | 47 |
| Figure 17. Impact des valeurs U des parois (W/m²K) : exigences de la norme PEB appliquées | 50 |
| Figure 18. Évolution du besoin annuel pour le chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation dans les murs extérieurs- Modèle A | 51 |
| Figure 19. Évolution du besoin annuel pour le chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation dans les murs extérieurs- Modèle B | 51 |
| Figure 20. Évolution du besoin annuel pour le chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation dans les murs extérieurs - Modèle C..... | 52 |
| Figure 21. Évolution du besoin annuel pour le chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation dans les murs extérieurs - Modèle D | 52 |
| Figure 22. Evolution du prix de l'isolation en euros (polystyrène expansé) et du besoin annuel pour le chauffage en kWh/an en fonction de l'épaisseur de l'isolant en cm..... | 53 |
| Figure 23. Rotation appliquée aux modèles 3D des maisons | 54 |
| Figure 24. Résultats de simulation pour l'étude de l'impact de l'orientation sur le besoin annuel pour le chauffage | 54 |
| Figure 25. Résultats de simulation pour l'étude de l'impact de l'orientation sur la surchauffe annuelle | 55 |
| Figure 26. Définition du facteur solaire "g"[21] | 56 |
| Figure 27. Impact du facteur solaire g sur le besoin annuel pour le chauffage | 56 |
| Figure 28. Impact du facteur solaire g sur la surchauffe annuelle | 56 |
| Figure 29. Evolution de la surchauffe annuelle dans les modèles en fonction des scénarios de PS et VN..... | 58 |
| Figure 30. Cas 1 : Estimation de la production annuelle photovoltaïque – sans solaire thermique..... | 62 |
| Figure 31. Cas 2 : Estimation de la production annuelle photovoltaïque – avec solaire thermique | 62 |
| Figure 32. Consommation annuelle estimée (kWh/an) pour la production d'eau chaude sanitaire..... | 64 |
| Figure 33. Variantes de simulation : combinaisons des systèmes | 66 |
| Figure 34. Encodage dans TRNBuild du système de chauffage de type électrique | 67 |

| | |
|--|-----|
| Figure 35. Bilan annuel en énergie primaire - V1a..... | 70 |
| Figure 36. Bilan annuel en énergie primaire - V1b..... | 73 |
| Figure 37. Bilan annuel en énergie primaire - V1c..... | 76 |
| Figure 38. Bilan annuel en énergie primaire - V2a..... | 80 |
| Figure 39. Bilan annuel en énergie primaire - V2b..... | 83 |
| Figure 40. Bilan annuel en énergie primaire - V2c..... | 86 |
| Figure 41. Bilan annuel en énergie primaire - V2d..... | 89 |
| Figure 42. Températures intérieures observées dans le modèle A avec un poêle à pellets pour la production de chauffage – température du séjour (rouge) ; température de la chambre 2 (marron) | 90 |
| Figure 43. Températures intérieures observées dans le modèle A avec un poêle à pellets pour la production de chauffage – température du séjour (rouge) ; température de la chambre 2 (marron) - Régulation dans la zone la plus froide | 91 |
| Figure 44. Relation entre la température de l'air extérieur et la température de soufflage du système VMC pour le chauffage de la maison | 94 |
| Figure 45. Schéma simplifié du système de chauffage combiné avec la production ECS par une pompe à chaleur air/eau..... | 96 |
| Figure 46. Bilan annuel en énergie primaire - V4a..... | 99 |
| Figure 47. Bilan annuel en énergie primaire - V4b..... | 102 |
| Figure 48. Bilan annuel en énergie primaire [kWhep/an] – synthèse..... | 103 |
| Figure 49. Bilan annuel des émissions de CO ₂ [kg/an] – synthèse..... | 105 |
| Figure 50. Bilan annuel du coût de l'énergie [€/an] – synthèse | 106 |
| Figure 51. Evaluation de la sous-chauffe en fonction du système de chauffage | 106 |

Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Tableau des caractéristiques principales de chacun de ces 4 modèles..... | 14 |
| Tableau 2. Profil d'occupation des modèles | 15 |
| Tableau 3. Profil des températures de consigne des modèles | 16 |
| Tableau 4. Valeurs des consommations annuelles pour différentes consignes de température pour le chauffage | 16 |
| Tableau 5. Profil de la période de chauffage des modèles | 16 |
| Tableau 6. Valeurs des consommations annuelles : avec et sans éclairage artificiel – modèle A | 20 |
| Tableau 7. Caractéristiques des gains internes liés à l'électroménager | 21 |
| Tableau 8. Valeurs des consommations annuelles : avec et sans appareil électroménager – modèle A | 21 |
| Tableau 9. Gains encodés dans les modèles : récapitulatif..... | 22 |
| Tableau 10. Valeurs des consommations annuelles : avec et sans gain interne – modèle A | 22 |
| Tableau 11. Débits hygiéniques minimaux prévus par l'annexe V de l'arrêté du gouvernement wallon du 10 mai 2012[17]..... | 26 |
| Tableau 12. Table de calcul des débits de ventilation appliqués dans le modèle TRNBuild – Maison A ; Schéma de ventilation appliqué dans le modèle TRNBuild – Maison A | 27 |
| Tableau 13. Table de calcul des débits de ventilation appliqués dans le modèle TRNBuild – Maison B ; Schéma de ventilation appliqué dans le modèle TRNBuild – Maison B | 28 |
| Tableau 14. Table de calcul des débits de ventilation appliqués dans le modèle TRNBuild – Maison C ; Schéma de ventilation appliqué dans le modèle TRNBuild – Maison C | 29 |
| Tableau 15. Table de calcul des débits de ventilation appliqués dans le modèle TRNBuild – Maison D ; Schéma de ventilation appliqué dans le modèle TRNBuild – Maison D | 30 |
| Tableau 16. Débits d'air neuf - modèles VallEnergie | 31 |
| Tableau 17. Efficacités de l'échangeur de chaleur en fonction des débits des ventilateurs..... | 31 |
| Tableau 18. Caractéristiques générales - Modèle A..... | 34 |
| Tableau 19. Valeurs U des parois - Modèle A | 34 |
| Tableau 20. Données sur les vitrages - Modèle A | 34 |
| Tableau 21. Surfaces transparentes - Modèle A | 35 |
| Tableau 22. Table des gains internes et ventilation encodés - Modèle A..... | 37 |
| Tableau 23. Caractéristiques générales - Modèle B..... | 38 |
| Tableau 24. Valeurs U des parois - Modèle B | 38 |
| Tableau 25. Données sur les vitrages - Modèle B | 38 |
| Tableau 26. Surfaces transparentes - Modèle B | 39 |
| Tableau 27. Table des gains internes et ventilation encodés - Modèle B..... | 41 |
| Tableau 28. Caractéristiques générales - Modèle C..... | 42 |
| Tableau 29. Valeurs U des parois - Modèle C | 42 |
| Tableau 30. Données sur les vitrages - Modèle C | 42 |
| Tableau 31. Surfaces transparentes - Modèle C | 43 |
| Tableau 32. Table des gains internes et ventilation encodés - Modèle C..... | 45 |
| Tableau 33. Caractéristiques générales - Modèle D | 46 |
| Tableau 34. Valeurs U des parois - Modèle D | 46 |
| Tableau 35. Données sur les vitrages - Modèle D | 46 |
| Tableau 36. Surfaces transparentes - Modèle D | 47 |
| Tableau 37. Table des gains internes et ventilation encodés - Modèle D | 48 |
| Tableau 38. Tableau des exigences de valeurs U max (portail de l'énergie en Wallonie : www.energie.wallonie.be)..... | 49 |
| Tableau 39. Valeurs U du modèle A comparées aux valeurs maximales de la norme PEB..... | 49 |
| Tableau 40. Evolution de la consommation pour le chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation - Modèle A | 53 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 41. Scénarios de simulation des protections solaires et ventilation nocturne | 57 |
| Tableau 42. Résultats de simulation - consommation pour le chauffage en fonction des scénarios de PS et VN | 57 |
| Tableau 43. Résultats de simulation : Impact des protections solaires sur la surchauffe annuelle – présence des occupants prise en compte | 58 |
| Tableau 44. Estimation du coût des protections solaires pour chaque modèle de maison, coût unitaire de 200€/m ² utilisé pour les calculs. | 58 |
| Tableau 45. Caractéristiques techniques des quatre types de panneaux solaires photovoltaïques comparés par simulation dynamique | 60 |
| Tableau 46. Résultats de simulation : Panneau 1 | 60 |
| Tableau 47. Résultats de simulation : Panneau 2 | 61 |
| Tableau 48. Résultats de simulation : Panneau 3 | 61 |
| Tableau 49. Résultats de simulation : Panneau 4 | 62 |
| Tableau 50. Description des quatre systèmes ECS comparés par simulation dynamique | 64 |
| Tableau 51. Consommation annuelle estimée (kWh/an) pour la production d'eau chaude sanitaire | 64 |
| Tableau 52. Variantes de simulation - Systèmes | 66 |
| Tableau 53. Variantes : Chauffage électrique | 67 |
| Tableau 54. Variantes : Poêle à pellets | 77 |
| Tableau 55. Variante : Air chaud pulsé | 93 |
| Tableau 56. Capacité de transport de l'air pour une température de pulsion de 40 °C | 94 |
| Tableau 57. Calcul des débits théoriques de ventilation pour compenser le besoin maximum pour le chauffage | 95 |
| Tableau 58. Calcul de la vitesse de l'air en fonction du débit théorique de ventilation et du diamètre des conduites..... | 95 |
| Tableau 59. Variantes : Système combiné | 96 |
| Tableau 60. Critère énergétique maison E+ par système - synthèse | 104 |

Contexte

Le projet transfrontalier VallEnergie a pour objectif principal d’initier l’autonomie énergétique, gérée par le local, de la vallée de l’Attert (Figure 1). Parmi les 6 actions menées à travers ce projet, l’action 3 est consacrée à la recherche de nouveaux concepts en énergies renouvelables. Parmi ces concepts, celui de la maison à énergie positive (maison E+) a été étudié. Celui-ci répond aux objectifs de l’Union Européenne (UE) en termes de performance énergétique des bâtiments. En effet, d’ici 2020 l’UE impose que toutes les nouvelles constructions soient zéro énergie. Pour atteindre cet objectif, la Directive européenne 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments, (et plus récemment la refonte de cette directive, la Directive PEB recast), décrit la notion de nZEB (« nearly Zero Energy Building »)[1]. Le concept s’est développé à travers les différents états membres, avec notamment la construction de « maisons à énergie positive ». Ce type de construction répond aux critères imposés par la législation européenne. De plus, ces nouvelles constructions sont conçues afin d’être en mesure de compenser un besoin énergétique résiduel faible par la production locale d’énergie renouvelable. Sur une base annuelle, la production d’énergie est supérieure à la consommation ce qui équivaut à bilan énergétique positif.

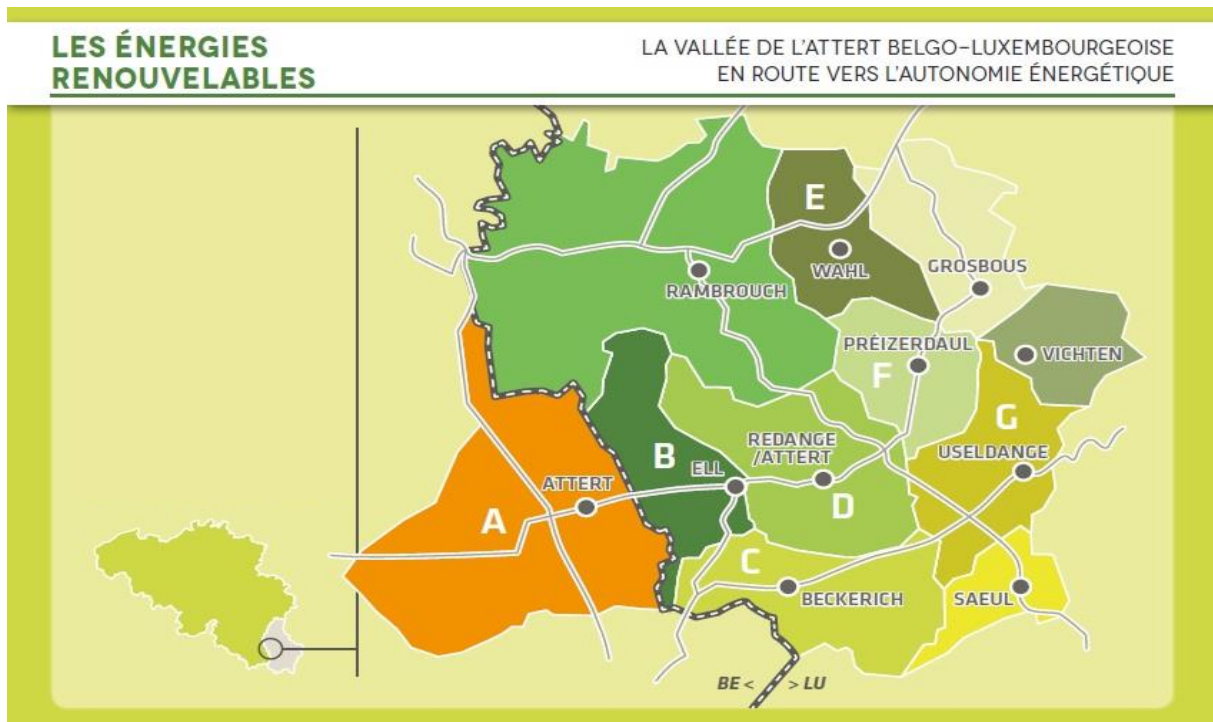


Figure 1. Vallée de l’Attert belgo-luxembourgeoise

Présentation de l'étude

L'étude de quatre projets de maisons à énergie positive a été menée dans le cadre du projet Interreg IV A « VallEnergie » et a pour objectif de déterminer quels seraient les choix optimaux, à la fois au regard de l'enveloppe mais également au niveau des installations techniques des bâtiments, qui permettraient d'atteindre la performance énergétique d'une maison à énergie positive. La première étape de l'étude a donc consisté à établir la définition de la maison à énergie positive, et de ce fait, déterminer les caractéristiques et les critères de performance d'une telle habitation.

Pour parvenir à une définition étant en adéquation avec les objectifs européens, un état des lieux du concept de maison à énergie positive à travers l'Europe a été réalisé. Cette première étape a permis de répertorier les différents critères clés de la maison E+. À l'issue de ce travail, et après consultation des différents acteurs du projet, une définition a été retenue pour la rédaction du cahier des charges (CDC) des maisons du projet VallEnergie. Celui-ci est un élément important de l'étude car il définit les différents critères qui devront être respectés par les maisons du projet afin d'atteindre le critère de maison E+ telle qu'elle est décrite dans le CDC.

La deuxième phase de travail repose sur le choix des différentes hypothèses utilisées pour la réalisation des modèles pour les simulations. En parallèle, des variantes de simulation ont également été définies pour comparer différentes solutions techniques pour la production de chauffage et eau chaude sanitaire (ECS).

Ces différentes variantes de systèmes ont été étudiées par le biais de simulations dynamiques dans le logiciel TRNSYS 17 (TRaNsient SYstem Simulation). Il s'agit ici d'étudier la réponse thermique des maisons aux différentes sollicitations au sein de leur environnement et en fonction des choix techniques pour le chauffage, l'ECS, la ventilation, la production d'énergie renouvelable (EnR), etc... .. Ces différents scénarios ont été analysés et comparés pour déterminer quel serait l'optimum¹ qui répondrait au mieux aux critères imposés par le cahier des charges des maisons.

À travers ce travail de simulations, ce sont la demande énergétique, le confort et les coûts liés à l'énergie, qui ont été analysés et comparés.

Remarque : les résultats obtenus par simulation reflètent le comportement des modèles construits à partir d'hypothèses. Le but étant d'avoir une première évaluation de la performance énergétique des différentes maisons du projet.

¹ Dans ce travail l'optimum correspond à la solution qui présente le meilleur compromis entre les différents critères définis par le CDC.

État de l'art

La directive européenne 2010/31/UE – PEB « recast »

La stratégie « 20-20-20 » de L'Union Européenne vise un triple objectif qui est de réduire de 20 % à la fois la consommation annuelle d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre (GES), et d'avoir une proportion de 20 % d'énergies renouvelables dans sa consommation énergétique, d'ici 2020 [2].

C'est dans ce contexte que la directive relative à l'efficacité énergétique a été instaurée. Il s'agit de la Directive 2012/27/UE (Directive Efficacité Énergétique), qui est entrée en vigueur le 04 décembre 2012. L'objectif est d'accroître de 20 % l'efficacité énergétique de l'Union Européenne d'ici 2020 [3]. Les 28 états membres de l'UE avaient ainsi jusqu'au 05 juin 2014 pour mettre en œuvre la plupart des dispositions de cette directive [3]. L'objectif pourra être atteint si les différents états font une utilisation plus efficace de l'énergie et ceci à tous les stades de la chaîne énergétique (de la transformation à la consommation finale, en passant par la distribution). La Directive 2012/27/UE, comme pour toute directive émanant du parlement européen et du conseil de l'union européenne, impose aux états membres un délai appréciable pour fixer les objectifs indicatifs nationaux d'efficacité énergétique [3]. Les états sont libres de choisir les critères ainsi que la méthode utilisée pour exprimer à la fin, un niveau absolu de consommation d'énergie primaire et finale en 2020 [3].

Cependant, le secteur du bâtiment (résidentiel et commercial) représente environ 40 % de la consommation totale d'énergie finale de l'UE, et il est à l'origine de 36 % des émissions totales de CO₂ [3][4]. Ainsi, le secteur de la construction présente un fort potentiel de réduction des besoins en énergie. C'est pourquoi réduire la consommation d'énergie des bâtiments résidentiels est devenu une priorité. Pour cela les états membres devront se référer à la directive 2010/31/UE qui est une refonte de la directive 2002/91/CE, concernant la performance énergétique des bâtiments (Directive PEB, autrement dénommée « DPEB ») [1]. Celle-ci fut adoptée le 19 mai 2010 par l'UE. Il s'agit du principal instrument législatif dont disposent les états membres afin de viser la réduction des consommations énergétiques dans les bâtiments. Ainsi la directive 2010/31/UE (DPEB), fournit les différentes lignes conductrices à suivre pour répondre à la volonté de l'Europe d'atteindre une meilleure performance énergétique.

La refonte de la directive a également introduit de nouveaux challenges pour les états membres. C'est dans ce cadre que la notion de nZeb (nearly-zero Energy Building ou bâtiment à énergie quasi-nulle), a vu le jour [1]. Ainsi, d'ici 2020 toutes nouvelles constructions et rénovations devront être des nZeb (en 2018 pour les bâtiments publics) [3]. Pour cela, il est imposé de mettre en place, au niveau national ou régional, une méthode de calcul de la performance énergétique des bâtiments qui doit prendre en compte plusieurs critères :

- les caractéristiques thermiques du bâtiment (capacité thermique, isolation, etc....);
- les équipements de chauffage et production en eau chaude sanitaire (ECS);
- les installations de climatisation;
- l'installation d'éclairage intégrée;
- les conditions climatiques intérieures.

D'autres éléments pourront être pris en compte dans le calcul, tels que l'orientation du bâtiment (en relation avec l'exposition solaire), le type d'éclairage (naturel ou non), les systèmes de chauffage et de refroidissement (urbains ou collectifs) pour intégrer leur effet positif sur la performance globale du bâtiment.

Définition des nZEB et NZEB

Les notions de « nZEB » et « NZEB » sont souvent confondues, voire indissociées. Il existe pourtant une différence entre ces deux termes. D'après le NREL (National Renewable Energy Laboratory – USA), les NZEB, Net Zero Energy Buildings, peuvent être définis comme étant des bâtiments résidentiels ou commerciaux présentant de très faibles besoins en énergie [5]. Ces besoins sont compensés par l'utilisation d'énergies renouvelables. Les NZEBs produisent autant, voire plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Le NREL a tenté, dans son rapport sur les NZEBs, de mettre en place une classification des bâtiments « zéro énergie net ». En effet, la définition de « zéro énergie » est tributaire des méthodes selon lesquelles l'utilisation de l'énergie est comptabilisée, ainsi que des objectifs des porteurs de projet. Ce sont ainsi 4 catégories de NZEBs qui sont distinguées par le NREL [5].

Ce classement graduel dépend essentiellement des sources d'énergies sollicitées par le bâtiment. Les critères suivants sont communément retenus, d'après le NREL, pour définir les NZEBs [5] :

- « **Net-Zero site energy** » : un NZEB « site », produit au moins autant d'énergie renouvelable qu'il n'en consomme par année, quand l'énergie est comptabilisée directement sur le site de consommation.
- « **Net-Zero source energy** » : un NZEB « source », désigne un NZEB produisant au moins autant d'énergie qu'il n'en consomme, quand l'énergie est comptabilisée à la source. Ceci signifie que l'énergie est acheminée sur le site de consommation et les calculs doivent tenir compte des facteurs de conversion en énergie primaire, selon le vecteur énergétique.
- « **Net-Zero cost energy** » : un NZEB « coût », la somme payée par le fournisseur en énergie pour racheter l'énergie réinjectée sur le réseau par le propriétaire du bâtiment doit être au moins égale à la somme versée par le propriétaire pour l'achat d'énergie correspondant à la consommation annuelle de son bâtiment.
- « **Net-Zero emissions** » : un NZEB « zéro émission » produit suffisamment d'énergie renouvelable sans émission pour compenser les émissions annuelles issues de la consommation énergétique globale du bâtiment. Le dioxyde de carbone, les oxydes d'azote et de soufre sont les émissions les plus communes compensées par les NZEBs. Pour calculer les émissions totales d'un bâtiment, (importées et exportées) l'énergie est multipliée par les facteurs d'émission appropriés (les valeurs vont dépendre du pays, et parfois même de la région dans laquelle se situe le bâtiment). Ce calcul doit tenir compte à la fois des émissions issues du réseau ainsi que celles générées directement sur le site d'utilisation de l'énergie.

Bien qu'un bâtiment puisse être conçu pour répondre à l'appellation de « NZEB », il peut s'avérer que d'une année à l'autre celui-ci n'entre plus dans les critères de « zéro énergie net ». En effet, cela dépend également des conditions météorologiques, qui peuvent certaines années, être exceptionnelles. Il arrive alors que le bâtiment devienne un « near NZEB » [5] lorsque les demandes en énergie de chauffe ou de refroidissement surpassent les apports en énergie.

L'étude américaine apporte donc une réelle avancée quant à la définition des bâtiments « zéro énergie net », appelés en France et en Belgique bâtiments à énergie positive compte tenu du fait qu'ils sont en mesure de produire plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Cependant, cette définition comporte une faille. En effet, dans le rapport du NREL, une attention particulière est portée sur le fait que tout bâtiment capable de produire plus d'énergie qu'il n'en consomme peut être qualifié de NZEB. Ainsi, même si une construction consomme une quantité conséquente d'énergie, tant que celle-ci est en mesure de produire autant voire plus que sa consommation, elle sera considérée comme étant à énergie positive. C'est pourquoi, au niveau européen notamment, certains pays tels que la France et la Belgique, imposent avant tout une réduction des besoins énergétiques pour pouvoir par la suite envisager la notion de maison à énergie positive. Par ailleurs, les besoins résiduels sont compensés par l'utilisation d'énergies renouvelables.

En Europe, la BPIE (Buildings Performance Institute Europe) fait uniquement référence à la notion de Nearly-Zero Energy Building (nZEB) [4], ou communément appelée « bâtiment à énergie quasi nulle » en Belgique et en France. La refonte de la DPEB impose que d'ici 2020, toutes les nouvelles constructions devront être des bâtiments à énergie quasi nulle (nZEBs). La directive définit un nZEB comme étant :

« Un bâtiment dont la consommation d'énergie est quasi nulle : un bâtiment qui a des performances énergétiques très élevées déterminées (...). La quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité. » [1].

Bien que chaque état membre se doive de respecter cette directive, la définition de la notion de nZEB reste vague. Ainsi, à travers l'Europe les critères définissant les bâtiments de type nZEB varient d'un pays à l'autre. L'étude réalisée dans le journal REHVA (Federation of European Heating, Ventilation and Air-Conditioning Associations), a permis de distinguer dix définitions des nZEB, à travers les états membres [6]. Ceci met en évidence les différences d'appréciation de la notion de nZEB, tant sur le contenu des définitions, que sur les niveaux d'ambition de chaque pays.

En Belgique, la situation est particulière étant donné que chaque région (Bruxelles-Capitale, Flandres et Wallonie) détient sa propre définition des bâtiments à énergie positive. En effet, bien que la norme PEB soit en vigueur à travers tout le pays, les régions disposent d'un degré de liberté. Ainsi les valeurs des critères peuvent différer d'une région à l'autre. Par exemple, dans la région bruxelloise (dans le cadre du projet « Bâtiments Exemplaires - BATEX ») les maisons à énergie positive, ou bâtiment « zéro énergie », doivent à la fois avoir une haute performance énergétique et recourir à de l'énergie d'origine renouvelable sur site pour couvrir leur demande énergétique. Par ailleurs, seuls « les besoins en énergie primaire pour le chauffage, l'ECS, l'électricité des auxiliaires (ventilation, pompe de circulation,...), le refroidissement et l'éclairage en situation normalisée d'après le vade-mecum du PHPP sont considérés [7].

En Wallonie, le service public de Wallonie (DGO4 – Département de l'Energie et du Bâtiment Durable) a élaboré un plan d'action intitulé : Plan d'Action NZEB relatif au recast de la DPEB [8]. Celui-ci a permis la création d'un marché public de service visant à élaborer une étude afin de déterminer à la fois :

- les exigences relatives aux bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle ;
- le niveau de performance énergétique optimal en fonction des coûts.

Ainsi, la Wallonie a entamé la phase de travail visant à établir une définition précise et standardisée de la notion de « nZEB », en respectant les critères imposés par la directive européenne DPEB, à savoir une performance énergétique accrue ainsi que la réduction des consommations en énergie et la réduction des émissions de CO₂.

Maison à énergie positive – Projet VallEnergie

Une définition de la maison à énergie positive VallEnergie a été élaborée. Cette définition est reprise dans le paragraphe B 1.2 du CDC du projet et impose les différents critères à remplir pour les quatre projets de maisons [9] :

Critères de construction d'une maison à énergie positive pour le projet VallEnergie :

*Une maison à énergie positive est une maison dont les performances énergétiques sont très élevées (**passive au minimum**) et dont le besoin résiduel en énergie primaire pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, la ventilation, l'éclairage et les auxiliaires est inférieur à la production locale d'énergie primaire, sur base d'un **bilan annuel**. Pour atteindre cet objectif, il s'agit de :*

1. *limiter des pertes de chaleur par transmission, ventilation et in/exfiltration.*
2. *Optimiser des gains solaires.*
3. *Utiliser des équipements performants dont le fonctionnement est optimisé et adapté aux occupants (production de chaleur, production d'eau chaude sanitaire, ventilation, éclairage, auxiliaires, électro-ménager).*
4. *Compenser par une production locale d'énergie renouvelable le besoin d'énergie résiduelle.*

Critères techniques :

Chacune des 4 maisons à énergie positive devra respecter les critères listés ci-dessous :

1. *Respect du critère : "maisons passives " de la région wallonne*
2. *Utilisation optimale des gains solaires en vue de diminuer la demande de chaleur et en éclairage artificiel mais en limitant la surchauffe*
3. *Maisons 3 façades*
4. *Surface utile de plus ou moins 120m², pour 4 personnes (2 adultes et 2 enfants)*
5. *Respect des normes et règlements de la région wallonne et de la commune d'Attert*
6. *Prix maximum de construction 1600 €/m² de surface utile HTVA, hors frais d'étude et d'architecte*
7. *Maison conçue en utilisant des solutions reproductibles*
8. *Choix de matériaux durables si possible :*
 - *utilisation rationnelle des matériaux ;*
 - *choix de matériaux locaux et/ou à faible énergie grise ;*
 - *choix de matériaux à faible impact environnemental.*
9. *Production sur place et de manière renouvelable de l'énergie nécessaire au fonctionnement de la maison (chauffage, ECS, ventilation, éclairage) sur base d'un bilan annuel*
10. *Utilisation de systèmes performants, adaptés aux besoins (rendements, régulation)*
11. *Bilan en énergie primaire (différence entre la production et la consommation) positif.*

Les maisons du projet devront respecter ces critères pour atteindre la performance d'une maison à énergie positive « E+ ».

En termes de performance énergétique, les maisons devront être « passive au minimum ». Les critères de certification de la maison passive applicables en Région wallonne (Figure 2) sont définis dans le vade-mecum du PHPP du résidentiel et sur le site de la plateforme pmp, comme suit [7][10]:

| Neuf | Mixte | Rénovation | → Passif |
|---|--------------|-------------------|---|
| Besoins nets en énergie de chauffage ² | | | ≤ 15 kWh/(m ² .an) |
| Besoins nets en énergie de refroidissement ² | | | - |
| Test d'étanchéité à l'air n ₅₀ selon la méthode A de la NBN EN 13829 ³ | | | ≤ 0,6 vol/h |
| Probabilité du risque de surchauffe ⁴ | | | ≤ 5% |
| Consommation en énergie primaire - Ep ² (comprenant le chauffage, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires, la production solaire et la cogénération) | | | Obligation de calculer la consommation en énergie primaire globale du bâtiment ou de l'unité de logement. Cette valeur sera mentionnée dans le certificat. |

2- Calcul à l'aide du logiciel PHPP 2007 ou plus récent

3- Les spécifications supplémentaires pour la mesure de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe des bâtiments sont fournies sur le lien suivant : <http://www.epbd.be/index.cfm?n01=air>.

4- Calcul à l'aide du logiciel PHPP 2007 ou plus récent ou à l'aide d'une simulation dynamique. Les hypothèses de calcul, les scénarios d'utilisation et/ou de fonctionnement, le zonage, les valeurs des apports internes considérés, devront être validés par la pmp/PHP avant toute demande de certification.

Figure 2. Critères de certification de la maison passive applicables en Région wallonne [7]

Par ailleurs, ce référentiel recommande les valeurs suivantes pour atteindre les exigences du passif [7], celles-ci n'étant pas obligatoires :

| | |
|---|---|
| U fenêtres et porte ¹⁷ | ≤ 0,85 W/(m ² .K) |
| Facteur g vitrage | g, 1,6 ≥ Ug |
| Rendement de l'unité de ventilation à double-flux | ≥ 75% |
| Consommation électrique de l'installation de ventilation | ≤ 0,45 Wh/m ³ |
| Autres | Si rénovation : Simulation des ponts thermiques avec l'analyse du risque de condensation |

17- La valeur du coefficient Uw de la fenêtre ou Ud de la porte tient compte des ponts thermiques de mise en œuvre

Figure 3. Recommandations du PHPP pour atteindre les exigences du passif [7]

Les maisons VallEnergie devront respecter au minimum ces critères. Mais le but est d'atteindre une performance supérieure au passif, grâce à une production locale d'énergie renouvelable capable de compenser voire de dépasser le besoin résiduel d'énergie primaire des maisons. Sur base des plans fournis par les architectes, l'Université de Liège a eu pour rôle à travers cette étude de déterminer si les maisons étaient en mesure de remplir ces différents critères. Différents scénarios ont ainsi été testés afin d'élaborer une solution optimale pour atteindre le critère de maison E+ d'après la définition élaborée dans le projet VallEnergie.

Les projets de maisons VallEnergie

Le travail entrepris repose sur l'étude de quatre maisons localisées de part et d'autre de la frontière belgo-luxembourgeoise. Les quatre projets ont pour vocation d'être construits. À travers cette étude, 4 modèles 3D des maisons ont été créés pour être par la suite intégrés dans le logiciel de simulation TRNSYS 17. L'étude de l'enveloppe et de différents systèmes énergétiques utilisés pour produire le chauffage et l'eau chaude sanitaire a été menée, pour enfin obtenir une maison qui respecte les critères imposés par le CDC du projet.

Pour distinguer les 4 projets, chaque maison se voit attribuer une lettre : A, B, C ou D. Par ailleurs, les maisons seront appelées « modèles ».

Belgique – modèles A et B

Le projet en Belgique concerne deux maisons de type 3 façades l'une par rapport à l'autre et situées dans la commune d'Attert sur le futur lotissement communal d'Heinstert (B-6717). Il s'agit ici des modèles de maisons appelés A et B. De plus amples informations concernant les modèles sont fournies dans les parties du rapport consacrées à chacun d'entre eux. Sur base des informations fournies (plans d'architectes et rapport PEB) par le bureau d'architecte en charge du projet, les deux modèles 3D ont été réalisés. Le projet de maisons mitoyennes a fait l'objet d'une première évaluation de la performance énergétique grâce au logiciel PEB. Ainsi les nombreuses informations relatives aux caractéristiques des maisons ont permis dès le départ la réalisation de modèles de simulation précis dans TRNSYS.

Grand-Duché du Luxembourg – modèles C et D

Le projet au Grand-Duché du Luxembourg concerne deux maisons de type 3 façades, situées dans deux communes différentes : Noerdange (L-8551) et Boevange (L-9740). Il s'agit ici des modèles de maison appelés C et D respectivement. Le modèle C, prévu pour être construit à Noerdange, est un projet de démolition d'une ancienne annexe et construction de maisons passives à la place. Il s'agit de construire trois nouvelles unités résidentielles qui présentent un bilan énergétique annuel positif. Dans le cadre de cette étude, seulement l'une des trois maisons a été sélectionnée pour les simulations. Le projet dont est issu le modèle D n'a pas fait l'objet d'étude préliminaire sur la performance énergétique, seuls les plans d'architectes étaient disponibles pour réaliser le modèle. De ce fait, aucune information sur la composition précise des parois n'était disponible, c'est pourquoi les compositions des parois du modèle C ont été également utilisées pour le modèle D.

Les principales caractéristiques des modèles sont présentées ci-dessous (Tableau 1).

| Modèles | | | | |
|---|-------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| | A | B | C | D |
| Localisation | Belgique Heinstert | Belgique Heinstert | Luxembourg Noerdange | Luxembourg Boevange |
| Type | neuf | neuf | neuf | neuf |
| Type constructif | massif | léger | léger | léger |
| Matériau constructif | brique | bois | bois | bois |
| Matériau isolant | EPS enrichi de graphite | cellulose | cellulose | cellulose |
| Vitrage | triple | triple | triple | triple |
| Ventilation | VMC double flux | VMC double flux | VMC double flux | VMC double flux |
| Taux infiltration n50 (vol/h) | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| Occupation (nb. Occupants) | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Consigne de température jour/nuit (°C) | 20/16 | 20/16 | 20/16 | 20/16 |
| Surface habitable (m²) | 120 | 127 | 142 | 140 |

Tableau 1. Tableau des caractéristiques principales de chacun de ces 4 modèles

Hypothèses de travail

Certaines hypothèses utilisées pour réaliser l'étude sont communes aux 4 projets de maisons E+. Celles-ci concernent notamment : les profils d'occupation, les consignes de température, la saison de chauffe, les gains internes, le taux d'infiltration (étanchéité à l'air de l'enveloppe), et la ventilation.

Climat

Le logiciel TRNSYS 17 est un outil puissant permettant l'étude du comportement thermique d'un bâtiment face aux conditions extérieures. Il faut ainsi renseigner un fichier météorologique contenant de nombreuses données (température et humidité de l'air, rayonnement solaire direct et diffus, température du sol, etc...) afin que le logiciel puisse simuler les conditions climatiques de l'environnement dans lequel se trouve le bâtiment en étude. Une bibliothèque de fichiers météorologiques est fournie avec TRNSYS 17, et parmi les données disponibles pour la Belgique, c'est le fichier de St Hubert (Figure 4) qui a été utilisé pour réaliser les différentes simulations (Annexe I).



Figure 4. Carte: distance St-Hubert / Attert: 60 km (Google Map™)

Profil d'occupation

Ce profil est identique pour les 4 maisons (Tableau 2). Sur base d'une composition de ménage de 4 personnes comprenant 2 adultes actifs et 2 enfants scolarisés, ce profil détermine les moments de la journée où les habitants sont présents dans la maison. À partir de cette hypothèse, des profils plus précis sont établis pour chaque « pièce de vie » afin de répartir les habitants de la maison selon l'heure de la journée. Ces profils d'occupation sont importants pour la prise en compte de gains de chaleur générés par les individus.

| Occupation hebdomadaire | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Heure de la journée : | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Semaine | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| W.E | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Présence* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Absence | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *2 adultes, 2 enfants | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tableau 2. Profil d'occupation des modèles

Régulation de la température de consigne

Ce profil détermine la consigne de température appliquée dans toutes les pièces de la maison équipées d'un dispositif de chauffe (Tableau 3). De ce fait, la consigne est unique pour toutes les pièces. Cette consigne varie de 16 °C à 20 °C. L'utilisation de l'une ou l'autre des températures dépend de la présence des occupants ainsi que du moment de la journée (jour/nuit).

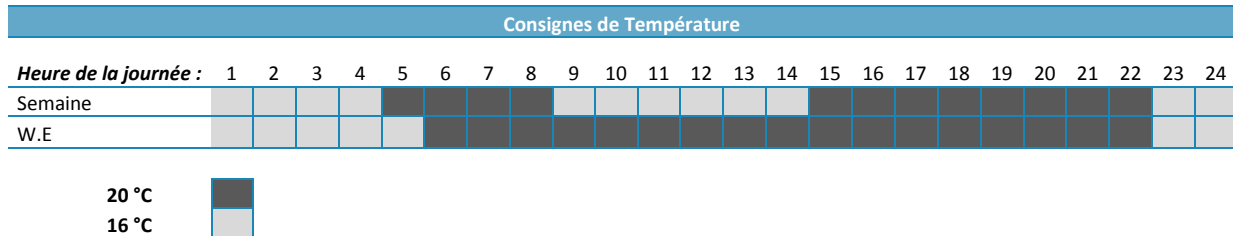


Tableau 3. Profil des températures de consigne des modèles

Déterminer la température de consigne dans la maison est un premier choix décisif sur la demande énergétique de la maison (Tableau 4). Pour illustrer ce propos, des simulations ont été réalisées pour comparer la consommation annuelle de la maison en kWh/an en fonction de différentes consignes de température. Le tableau suivant donne les résultats pour différentes consignes testées sur le modèle de référence* :

| Simulation – modèle A | Consigne 16/19 | Consigne 16/20 | Consigne 16/21 |
|--|----------------|----------------|----------------|
| Consommation annuelle pour le chauffage (kWh/an) | 1414 | 1696 | 2001 |
| Variation relative | -17 % | - | +18 % |

*Le modèle de référence utilisé pour la comparaison est un modèle comprenant un chauffage à puissance illimitée capable de couvrir instantanément la demande d'énergie de la maison pour compenser ses pertes. Ce modèle regroupe toutes les hypothèses de base utilisées dans l'étude et présentées dans ces premiers chapitres.

Tableau 4. Valeurs des consommations annuelles pour différentes consignes de température pour le chauffage

Une variation de la température de consigne de 1 °C induit une variation de la consommation annuelle en énergie de 18 %, dans le cas de ce modèle. Dans la littérature, la valeur de 8 % est souvent retrouvée. Ici les maisons sont passives au minimum et présentent une très bonne performance énergétique. Ceci sous-entend que les maisons sont beaucoup plus sensibles à la variation de paramètres, tel que dans le cas présent, le changement de la température de consigne. Les résultats complets de cette analyse sont fournis en Annexe II.

Période de chauffage

Ce profil a pour objectif de tenir compte du moment de l'année où le système de chauffe est à l'arrêt (Tableau 5). Dans le cadre de l'étude, ce profil est une simple mesure de sécurité pour éviter l'allumage du système lors de journées plus « fraîches » durant les périodes pré-estivale et automnale. La période de chauffe s'étend de mi-mai à mi-septembre.

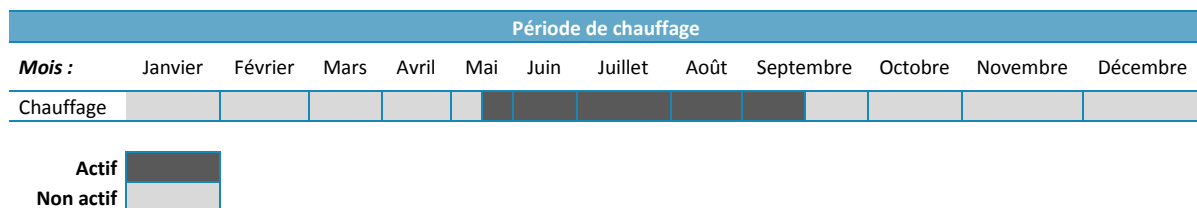


Tableau 5. Profil de la période de chauffage des modèles

Contrôles des protections solaires

Les protections solaires représentent un moyen de lutte efficace contre le risque de surchauffe en été. Cet élément a donc été intégré dans chacun des modèles de simulation afin d'optimiser le confort en été dans les bâtiments. Pour chaque maison, des protections solaires ont été prévues pour les vitrages les plus exposés au soleil et étant à l'origine d'un possible risque de surchauffe. Le fonctionnement de ces protections est similaire à celui d'une utilisation idéale. En effet, ce système est prévu pour fonctionner de la manière suivante :

- Abaissement des protections : lorsque le rayonnement incident est supérieur ou égal à 140 W/m^2 , les protections sont abaissées et la part de rayonnement à travers le vitrage est de 10 % (soit un facteur d'ombrage de 90 % [11]).
- Retrait des protections : lorsque le rayonnement est inférieur à 120 W/m^2 , les protections se relèvent et laissent passer le soleil. Dans ce cas, la part de rayonnement passant à travers le vitrage est de 100 % (le facteur solaire de la vitre doit être pris en compte pour avoir la valeur réelle du rayonnement passant à travers le vitrage).

Les protections sont prévues pour être en fonctionnement uniquement l'été (de mi-mai à mi-septembre cf. page 12). Les protections simulées sont des protections solaires externes.

Ventilation nocturne

Un autre moyen efficace de lutte contre la surchauffe est la ventilation nocturne. Celle-ci repose entièrement sur le comportement des habitants puisqu'elle consiste à ouvrir la nuit les fenêtres de la maison. Le but étant d'évacuer le surplus de chaleur accumulé en journée grâce à une ouverture des fenêtres en soirée et la nuit, quand la température est plus fraîche. Pour simuler cette ventilation, un renouvellement d'air supplémentaire (couplé à la ventilation initiale) ayant une valeur de 4 vol/h [12] est encodé dans les modèles. Ce débit correspond au débit estimé d'une fenêtre ouverte en oscillo-battant.

Évaluation de la surchauffe et de la sous-chauffe

Le confort intérieur est un critère incontournable dans l'étude de la performance d'un bâtiment. En hiver, ce confort peut être évalué par la capacité du système de chauffage à fournir suffisamment d'énergie pour atteindre et maintenir la température de consigne souhaitée par l'utilisateur. Si le système n'est pas en mesure d'atteindre et maintenir cette température, il est possible de parler de la « sous-chauffe » qui est calculée par le nombre de degrés-heure pendant lesquels la température ambiante est inférieure à la température de consigne lors des heures de fonctionnement du système de chauffage. À l'inverse, la surchauffe en été est exprimée par le nombre de degrés-heures où la température ambiante dépasse une certaine température. Pour évaluer cette surchauffe, le critère de la maison passive concernant le risque de surchauffe admissible dans une maison passive a été retenu. Celui-ci détermine une valeur limite de 5 % du temps où la température moyenne intérieure est supérieure à 25 °C sur l'année [10][13]. C'est donc sur cette base que la surchauffe dans les maisons du projet a été étudiée. Par ailleurs, un élément a été intégré dans le calcul de la surchauffe, il s'agit de la prise en compte de la présence des occupants. En effet, la surchauffe n'est évaluée que lorsque les habitants sont présents dans le bâtiment. Ainsi la surchauffe prend une dimension plus réaliste si l'occupation est intégrée dans le calcul.

Gains internes

Bien qu'il existe une large différence entre les maisons passives et les maisons traditionnelles concernant la consommation d'énergie pour le chauffage, les gains internes restent sensiblement inchangés entre ces deux types de maisons. Néanmoins, la contribution des apports internes de chaleur dans la couverture des pertes thermiques va considérablement varier entre les maisons passives et les autres. En effet, alors que dans une maison traditionnelle les gains internes peuvent couvrir environ 20 % des pertes, ils en couvriraient près de 65 % dans le cas d'une maison passive [14]. Par ailleurs, une surévaluation de ces gains conduirait à sous-estimer la demande de chauffage de la maison. À l'inverse, sous-évaluer les apports internes conduirait à une surestimation de cette même demande. L'établissement des profils de gains internes permet donc de réaliser une étude plus fine du comportement de la maison et de sa demande en énergie pour le chauffage. Les sources principales de gains internes sont : les personnes, l'éclairage et les appareils électroménagers.

Les occupants

Le corps humain est à l'origine d'un certain dégagement de chaleur en fonction de l'activité de celui-ci. Ce dégagement de chaleur va augmenter avec l'intensité de cette activité. Ainsi un corps au repos dégage moins de chaleur qu'au cours d'un exercice physique. L'activité métabolique va influencer la quantité de chaleur (chaleur sensible) et d'humidité (chaleur latente) émanant du corps humain. La norme ISO 7730 (Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local), codifie la chaleur sensible et latente dégagées par un individu en fonction de son activité (Figure 5) :

| Activity | Metabolic rate | |
|---|------------------|-----|
| | W/m ² | met |
| Reclining | 46 | 0,8 |
| Seated, relaxed | 58 | 1,0 |
| Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory) | 70 | 1,2 |
| Standing, light activity (shopping, laboratory, light industry) | 93 | 1,6 |
| Standing, medium activity (shop assistant, domestic work, machine work) | 116 | 2,0 |
| Walking on level ground: | | |
| 2 km/h | 110 | 1,9 |
| 3 km/h | 140 | 2,4 |
| 4 km/h | 165 | 2,8 |
| 5 km/h | 200 | 3,4 |

Figure 5. Table des taux métaboliques en fonction des activités – issue de l'EESTI STANDARD EVS-EN ISO 7730:2006[15]

Pour répartir de manière la plus réaliste possible l'apport de chaleur générée par les occupants dans l'habitation, des profils de présence ont été établis pour les pièces considérées comme espaces de vie (Figure 6).

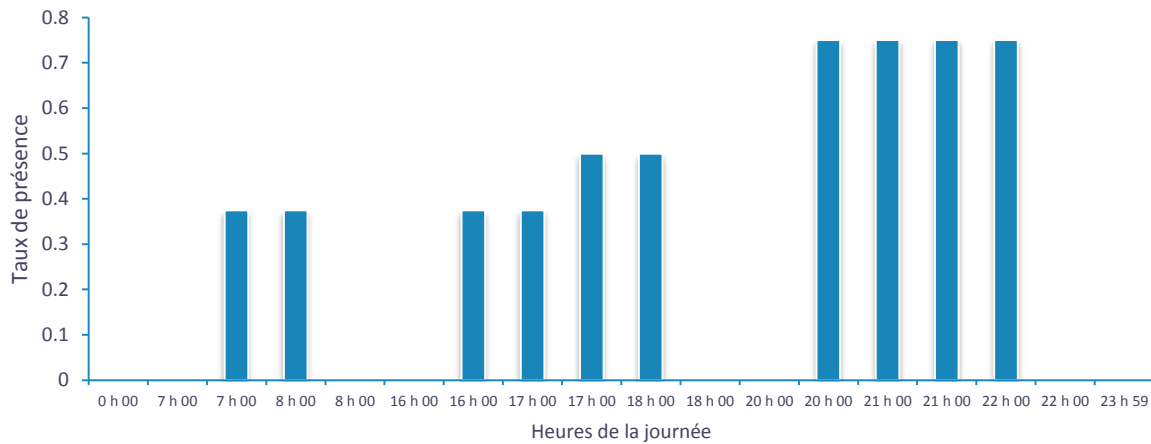


Figure 6. Exemple de profils d'occupation dans la zone « séjour »

Ces profils tiennent compte à la fois du nombre d'occupants présents dans une zone à chaque heure de la journée, appelé ici taux de présence, ainsi que du taux métabolique exprimé en watts et donnant l'information sur la chaleur sensible générée par cette présence.

Le taux de présence est un facteur multipliant le nombre total d'occupants de la maison, soit 4 individus comme mentionné page 11, et permet de calculer le nombre de personnes présentes dans la zone :

$$\text{Taux de présence} \times \text{nombre total d'occupants} = \text{nombre de personnes présentes dans la zone}$$

Exemple :

*0.75*4 = 3 personnes présentes dans la zone à cet instant. Les watts dégagés à ce moment correspondent à l'activité métabolique de ces trois personnes.*

L'éclairage

L'éclairage artificiel est également une source de chaleur dans un bâtiment. Parce que ce gain est pris en compte dans le bilan énergétique de la maison [9], il est important d'établir son profil de fonctionnement. Pour les 4 maisons du projet, il a été considéré pour le calcul de ce gain une puissance de 3 W/m². Ainsi la surface de la pièce éclairée est multipliée par cette puissance. Ceci permet de définir le nombre de watts dégagés par l'éclairage au cours de son utilisation. Un profil de fonctionnement de l'éclairage a été établi afin de tenir compte à la fois de la présence des occupants mais également du rayonnement solaire extérieur (Figure 7).

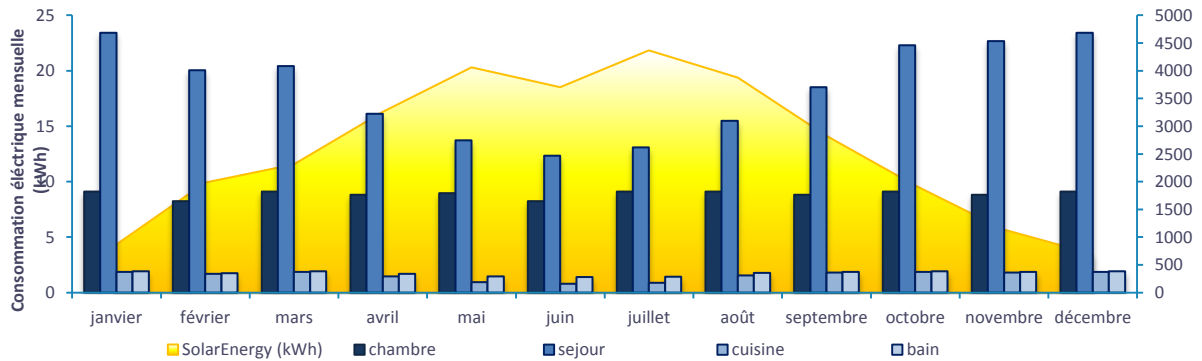


Figure 7. Consommation électrique mensuelle pour l'éclairage, par zone et en fonction du mois de l'année - modèle A.

L'utilisation du logiciel TRNSYS permet de déterminer le nombre d'heures où l'éclairage a été mis sur la position « ON » et de calculer par conséquent, la quantité d'énergie consommée pour l'éclairage sur une année.

À partir des hypothèses concernant l'éclairage artificiel et son profil d'utilisation, une analyse de l'impact de ce gain sur le bilan énergétique de la maison a été réalisée. Le but est de comparer un modèle avec et sans éclairage. Cette étude a été effectuée sur l'un des modèles de maisons: le modèle A (Tableau 6).

| Simulation – modèle A | Modèle avec gain d'éclairage* | Modèle sans gain d'éclairage |
|--|-------------------------------|------------------------------|
| Consommation annuelle pour le chauffage (kWh/an) | 1696 | 1858 |
| Variation relative | - | +9.5 % |

*Le modèle de référence utilisé pour la comparaison est un modèle comprenant un chauffage à puissance illimitée capable de couvrir instantanément la demande d'énergie de la maison pour compenser ses pertes. Ce modèle regroupe toutes les hypothèses de base utilisées dans l'étude et présentée dans ces premiers chapitres.

Tableau 6. Valeurs des consommations annuelles : avec et sans éclairage artificiel – modèle A

Dans le cas de ce modèle, les gains internes liés à l'éclairage couvriraient près de 10 % des pertes thermiques de la maison sur base d'un bilan annuel.

L'électroménager

La dernière source de chaleur est celle liée aux appareils électroménagers. Dans les hypothèses retenues pour les modèles, trois types d'appareils ont été pris en compte pour les gains internes générés par l'électroménager. Il s'agit : d'un réfrigérateur, d'un appareil de cuisson et d'une télévision (Tableau 7). Le temps de fonctionnement considéré pour chaque appareil, ainsi que les puissances de chacun d'entre eux sont les suivants :

| Caractéristiques/Appareils | Réfrigérateur | | Cuisson | | Télévision | |
|--|---------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| Durée de fonctionnement journalière (h/jour) | 24 | | 1 | | 4 | |
| Puissance (W) | convective | radiative | convective | radiative | convective | radiative |
| | 13 | 4 | 203 | 68 | 75 | 25 |
| Total (W) | 17 | | 271 | | 100 | |

Tableau 7. Caractéristiques des gains internes liés à l'électroménager

Pour chaque gain, la part de convection et de radiation doit être renseignée dans le logiciel TRNSYS. Pour les appareils électroménagers, cette part a été fixée à 75 % de convection et 25 % de radiation. Pour le réfrigérateur, il a été considéré que le moteur fonctionnait en continu.

Un modèle sans gain lié aux équipements électroménagers voit sa consommation annuelle augmenter légèrement (Tableau 8).

| Simulation – modèle A | Modèle avec gains électroménagers* | Modèle sans gain électroménager |
|--|------------------------------------|---------------------------------|
| Consommation annuelle pour le chauffage (kWh/an) | 1696 | 1842 |
| Variation relative | - | +8.6 % |

**Le modèle de référence utilisé pour la comparaison est un modèle comprenant un chauffage à puissance illimitée capable de couvrir instantanément la demande d'énergie de la maison pour compenser ses pertes. Ce modèle regroupe toutes les hypothèses de base utilisées dans l'étude et présentée dans ces premiers chapitres.*

Tableau 8. Valeurs des consommations annuelles : avec et sans appareil électroménager – modèle A

Table des gains internes encodés

Les gains encodés dans chacun des modèles sont repris dans le tableau suivant, Tableau 9 (puissance des gains en Watts et zone dans laquelle les gains sont pris en compte).

| Gains internes | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Modèles | A | B | C | D |
| Nombre de gains encodés | 13 | 13 | 14 | 14 |
| ECLAIRAGE [Watts] – puissance unitaire : 3W/m² | | | | |
| Séjour | 125 | 158 | 122 | 42 |
| Cuisine | 30 | 27 | 31 | 87 |
| Chambres | 147 | 138 | 117 | 117 |
| Bain | 31 | 33 | 50 | 51 |
| Halls | | | 98 | 105 |
| OCCUPATION [Watts] | | | | |
| Séjour | 240 | 480 | 480 | 480 |
| Cuisine | 120 | 120 | 120 | 120 |
| Chambres (parents) | 240 | 240 | 240 | 240 |
| Chambres (enfant) | 120 | 120 | 120 | 120 |
| Bain | 120 | 120 | 120 | 120 |
| APPAREILS [Watts] | | | | |
| Cuisson | 270 | 270 | 270 | 270 |
| Réfrigérateur | 17 | 17 | 17 | 17 |
| Téléviseur | 100 | 100 | 100 | 100 |

Tableau 9. Gains encodés dans les modèles : récapitulatif

La suppression totale des gains dans les modèles conduit à une forte augmentation de la consommation annuelle d'énergie pour le chauffage. Les résultats ci-dessous sont donnés pour l'une des maisons, la maison A, et compare un modèle avec et sans les gains internes (Tableau 10). Les résultats complets de cette simulation sont en Annexe III.

| Simulation – modèle A | Modèle avec gains internes* | Modèle sans gains internes |
|--|-----------------------------|----------------------------|
| Consommation annuelle pour le chauffage (kWh/an) | 1696 | 3077 |
| Variation relative | - | +81 % |

*Le modèle de référence utilisé pour la comparaison est un modèle comprenant un chauffage à puissance illimité capable de couvrir instantanément la demande d'énergie de la maison pour compenser ses pertes. Ce modèle regroupe toutes les hypothèses de base utilisées dans l'étude et présentée dans ces premiers chapitres.

Tableau 10. Valeurs des consommations annuelles : avec et sans gain interne – modèle A

L'absence complète de gain interne dans le modèle étudié a un impact sans précédent sur la consommation annuelle d'énergie pour le chauffage puisque celle-ci passe de 1696 kWh/an pour le modèle de référence avec les gains internes à 3077 kWh/an, soit plus du double, pour le même modèle mais sans les gains internes. Il faut également noter que l'impact des gains ne se fait pas qu'au niveau de la consommation énergétique du bâtiment, mais également au niveau de la température intérieure de celui-ci. L'examen de la température moyenne dans la maison A, indique que les gains internes jouent un rôle sur la fluctuation de celle-ci au cours de la journée. Ces gains peuvent être à l'origine d'un risque de surchauffe dans la maison (par exemple : par le fonctionnement simultané de plusieurs appareils : cuisson, télévision, ordinateur(s), etc...).

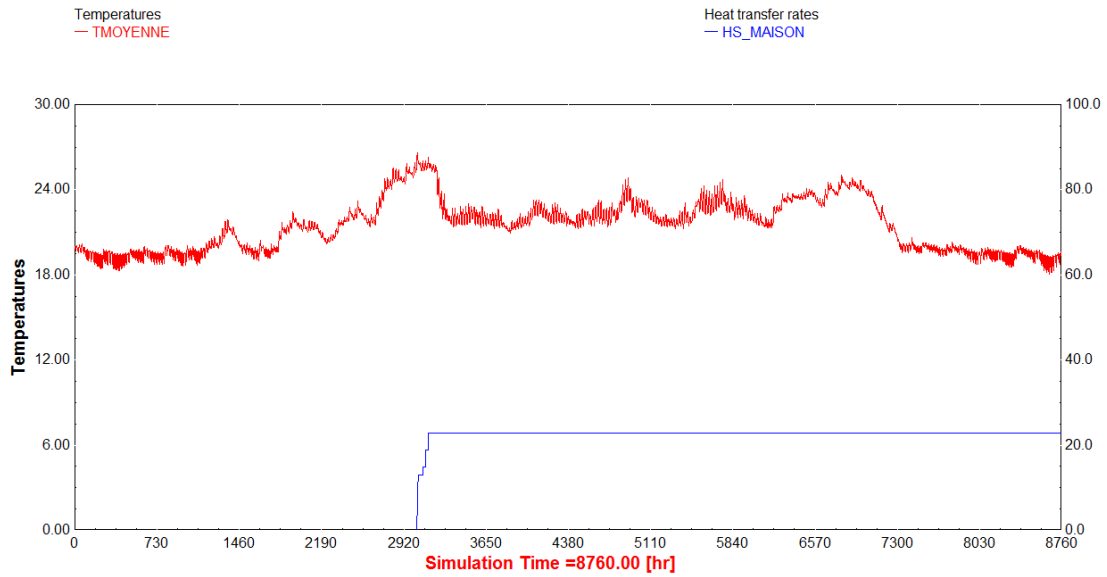


Figure 8. Température moyenne dans la maison A au cours de l’année (rouge) et nombre d’heures de surchauffe (bleue ; température moyenne supérieure à 25 °C) – modèle A avec gains internes et hypothèses par défaut.

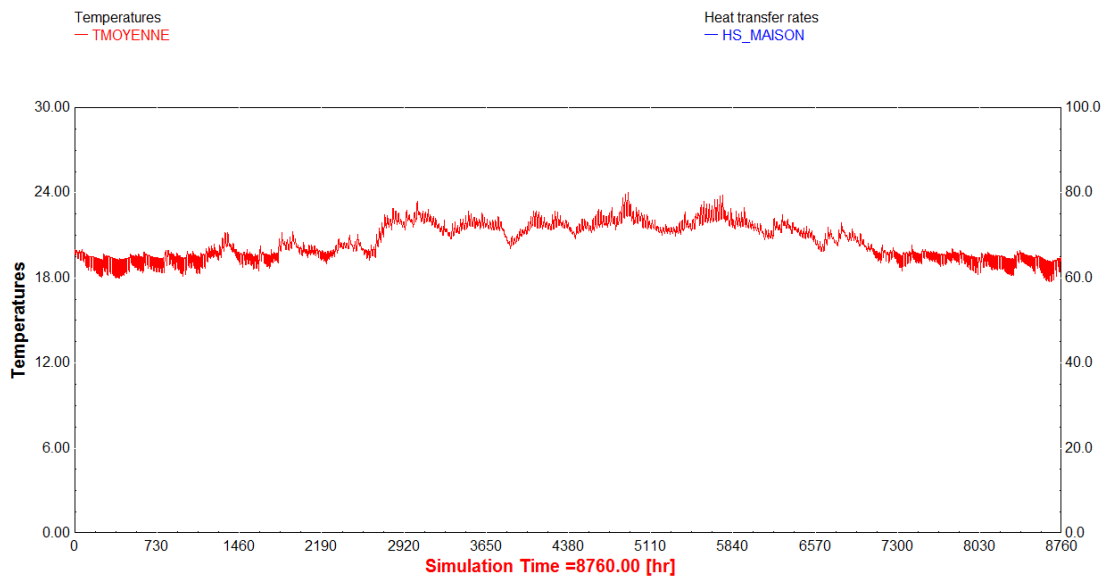


Figure 9. Température moyenne dans la maison A au cours de l’année (rouge) et nombre d’heures de surchauffe (bleue ; température moyenne supérieure à 25 °C) – modèle A sans gain interne et hypothèses par défaut.

Par rapport à un modèle avec gains internes (Figure 8), la température est plus stable dans une maison sans gain interne (Figure 9). Ceci est normal compte tenu du fait que les gains représentent des apports de chaleur non maîtrisés. Ceci sous-entend que ce sont des injections ponctuelles de chaleur dans la maison et celles-ci peuvent avoir lieu à des moments où le bâtiment n’a pas besoin de compenser des pertes thermiques (notamment l’été). L’influence des gains internes est donc positive en hiver, car elle compense une partie des pertes thermiques, mais négative en été, car elle induit une élévation de la température intérieure et donc un probable risque de surchauffe.

Taux d'infiltration

Le projet de maisons E+ en Belgique a défini dans le cahier des charges certains critères de performance minimale à atteindre, dont un taux d'infiltration équivalent à celui imposé par le standard de la maison passive. L'hypothèse a été retenue pour les 4 maisons. Le taux de renouvellement d'air par infiltration est un indicateur de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure de la maison. Cette étanchéité joue un rôle non négligeable sur la performance du bâtiment. Les fuites d'air incontrôlées à travers l'enveloppe peuvent induire entre autres : un court-circuit du flux de ventilation, des courants d'air et l'augmentation de la consommation d'énergie [16]. Assurer la bonne étanchéité à l'air de l'enveloppe est indispensable pour compléter les installations énergétiques prévues dans les maisons.

Dans l'étude, le taux d'infiltration appliqué est donc celui d'une maison passive, $n50$, fixé à $0,6 \text{ h}^{-1}$. D'après la valeur du $n50$, le taux de ventilation saisonnier n_{sb} peut être calculé selon la formule :

$$n_{sb} = \frac{n50}{a}$$

où le facteur « a » dépend de l'influence du vent sur le bâtiment :

- $a=30$, habitations fortement protégées des vents
- $a=10$, habitations fortement exposées aux vents

Dans le cadre du projet, la valeur de 20 est attribuée au facteur « a » (ceci correspond à une protection moyenne). Ce calcul permet d'être au plus près des conditions réelles des différences de pressions s'exerçant sur une maison. Ainsi la valeur de $0,03 \text{ h}^{-1}$ a été choisie pour la création des modèles servant par la suite pour les simulations dans le logiciel TRNSYS 17.

Ventilation

Les débits de ventilation utilisés vont dépendre de chacune des maisons. Cependant, l'hypothèse commune aux 4 projets est que les calculs de débits de ventilation doivent répondre simultanément aux normes belge et luxembourgeoise. Par ailleurs, la ventilation installée dans les 4 projets est de type mécanique (alimentation et extraction d'air) contrôlée, à double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait, dont l'efficacité de l'échangeur est fixée à 80 %. Un by-pass est également prévu lors de la saison estivale (Figure 10).

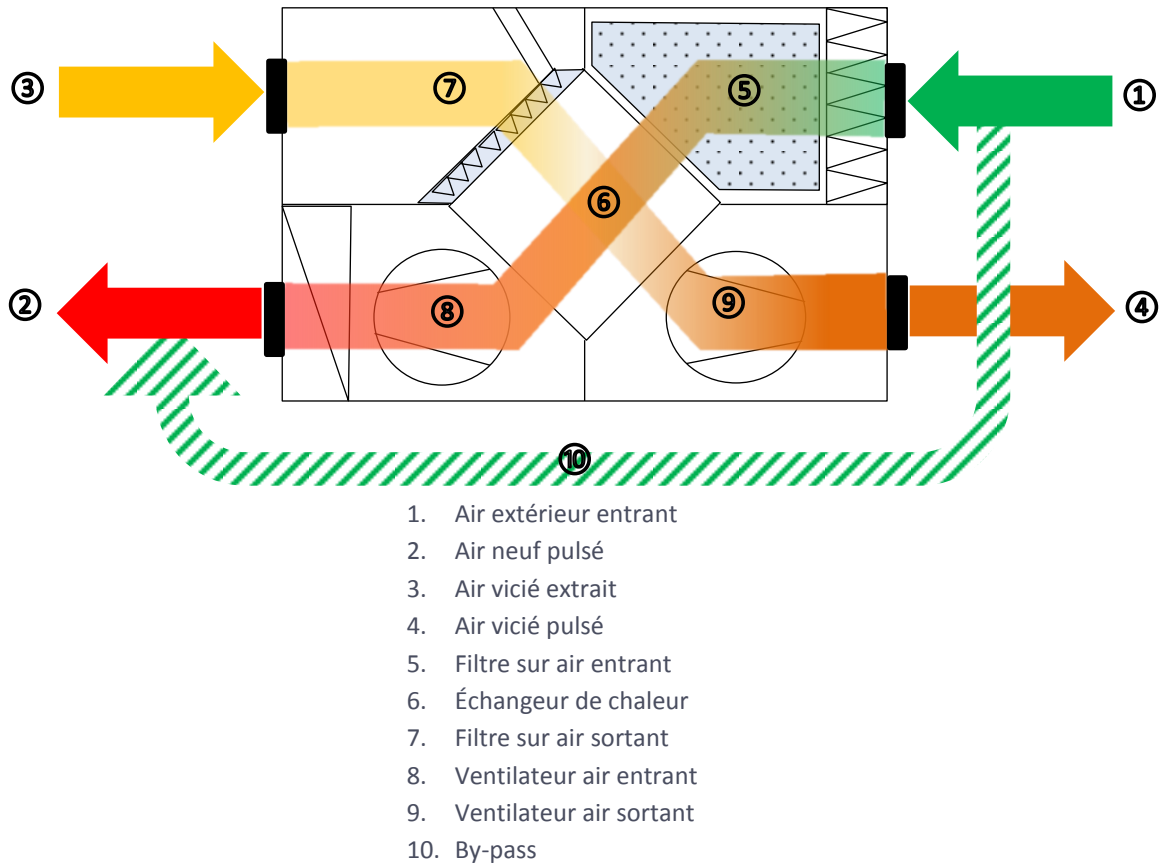


Figure 10. Schéma d'une ventilation mécanique double flux avec by-pass

La loi utilisée pour le by-pass en été est la suivante :

Si la température de l'air extérieur est inférieure à 15 °C, alors l'air neuf pulsé dans la maison passe à travers l'échangeur et récupère la chaleur de l'air vicié extrait. Dans le cas contraire, si la température de l'air extérieur est supérieure à 15 °C, l'air neuf est directement pulsé dans la maison sans réaliser d'échange avec l'air vicié. Ceci permet de limiter la température de l'air pulsé dans la maison et d'éviter un risque de surchauffe supplémentaire en été.

Ventilation : législations belges et luxembourgeoisesBelgique

Les valeurs de débits appliquées dans les maisons belges sont calculées en fonction des débits hygiéniques minimaux prévus par l'annexe V de l'arrêté du gouvernement wallon du 10 mai 2012 [17] faisant référence à la norme NBN D50-001. La valeur minimale du débit hygiénique est fixée à $3.6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$. Cependant, cette valeur peut varier selon le type de pièce (Tableau 11).

| | Amenée d'air neuf | Évacuation d'air vicié |
|--|---|---|
| Règle générale | $3.6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ de surface au sol | |
| Avec limites particulières | | |
| Living | min. $75 \text{ m}^3/\text{h}$ (max. $150 \text{ m}^3/\text{h}$) | |
| Chambres, locaux d'études et de jeux | min. $25 \text{ m}^3/\text{h}$ (max. $72 \text{ m}^3/\text{h}$ par personne) | |
| Cuisines fermées, salles de bain, buanderies | | min. $50 \text{ m}^3/\text{h}$ (max. $75 \text{ m}^3/\text{h}$) |
| Cuisines ouvertes | | min. $75 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| W.C | | $25 \text{ m}^3/\text{h}$ |

Tableau 11. Débits hygiéniques minimaux prévus par l'annexe V de l'arrêté du gouvernement wallon du 10 mai 2012[17]

Grand-Duché de Luxembourg

L'avis de la chambre des métiers du Luxembourg sur la performance énergétique donne une valeur minimale pour le renouvellement d'air neuf hygiénique de 0.35 h^{-1} [18].

Ventilation : méthode de calcul des débits

La méthode de calcul des débits de ventilation présentée ci-après a été utilisée dans les 4 maisons. Le calcul permet de s'assurer que les débits respectent simultanément les législations belges et luxembourgeoises. La norme luxembourgeoise étant plus souple qu'en Belgique, ce sont les débits calculés pour répondre à la norme belge qui seront utilisés dans les modèles de simulation (Tableaux 12, 13, 14 et 15).

Remarque : les tables présentées ci-après informent sur les débits théoriques qui devraient être appliqués dans les maisons d'après les normes de ventilation en Belgique. Cependant, le schéma de ventilation faisant suite à la table de calculs peut différer de celle-ci. En effet, il a été décidé de réaliser une recirculation dans les maisons afin de réduire le volume d'air neuf insufflé au sein de chaque maison.

Tableau 12. Table de calcul des débits de ventilation appliqués dans le modèle TRNBuild – Maison A ; Schéma de ventilation appliqué dans le modèle TRNBuild – Maison A

| Maison A | | Caractéristiques des zones ventilées | | | | | Annexe Vde l'Arrêté du Gouvernement Wallon - NBN D50-001 | | | | Débits de ventilation utilisés pour les modèles de simulation | | | Avis de la chambre des métiers du Luxembourg sur la performance énergétique | |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|--|---|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|--|-------------------------|
| ZONES VENTILÉES | | Longueur (m) | Largeur (m) | Hauteur (m) | Volume (m ³) | Surface au sol (m ²) | Règle générale (m ³ /h.m ²) | Débit nom. requis (m ³ /h) | Débit min. (m ³ /h) | Débit max. (m ³ /h) | Débit théorique (m ³ /h) | Ajustement des débits pour les modèles TRNSYS (m ³ /h) | Débit retenu pour TrnBuild (kg/h) | ≥ 0,35 h-1 de renouvellement d'air | Application de la norme |
| Amenée | SEJOUR | 5.7 | 3.1 | 2.5 | 44.5 | 17.8 | 3.6 | 64.0 | 75.0 | 150.0 | 64.0 | 64.0 | 76.8 | 1.4 | Norme respectée |
| | SEJOUR_BIS | 4.7 | 4.2 | 2.5 | 48.8 | 19.5 | 3.6 | 70.2 | 75.0 | 150.0 | 70.2 | 70.0 | 84.0 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 1 | 4.4 | 3.0 | 2.5 | 32.7 | 13.1 | 3.6 | 47.1 | 25.0 | 72.0 | 47.1 | 47.0 | 56.4 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 2 | 3.9 | 3.1 | 2.5 | 29.7 | 11.9 | 3.6 | 42.8 | 25.0 | 72.0 | 42.8 | 42.0 | 50.4 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 3 | 3.2 | 3.6 | 2.5 | 29.0 | 11.6 | 3.6 | 41.8 | 25.0 | 72.0 | 41.8 | 41.0 | 49.2 | 1.4 | Norme respectée |
| <i>Total</i> | | | | | | | | 266.0 | | | 266.0 | 264.0 | 316.8 | | |
| Extraction | CUISINE ouverte | 3.0 | 2.5 | 2.5 | 18.8 | 7.5 | - | - | 75.0 | - | 75.0 | 91.0 | 109.2 | 4.9 | Norme respectée |
| | BUANDERIE | 3.0 | 2.5 | 2.5 | 18.5 | 7.4 | 3.6 | 26.6 | 50.0 | 75.0 | 50.0 | 66.0 | 79.2 | 3.6 | Norme respectée |
| | WC | 0.9 | 1.3 | 2.5 | 2.9 | 1.2 | - | - | 25.0 | - | 25.0 | 41.0 | 49.2 | 14.0 | Norme respectée |
| | BAIN | 3.0 | 2.6 | 2.5 | 19.5 | 7.8 | - | - | 50.0 | - | 25.0 | 66.0 | 79.2 | 3.4 | Norme respectée |
| <i>Total</i> | | | | | | | | 200 | | | 175.0 | 264.0 | 316.8 | | |

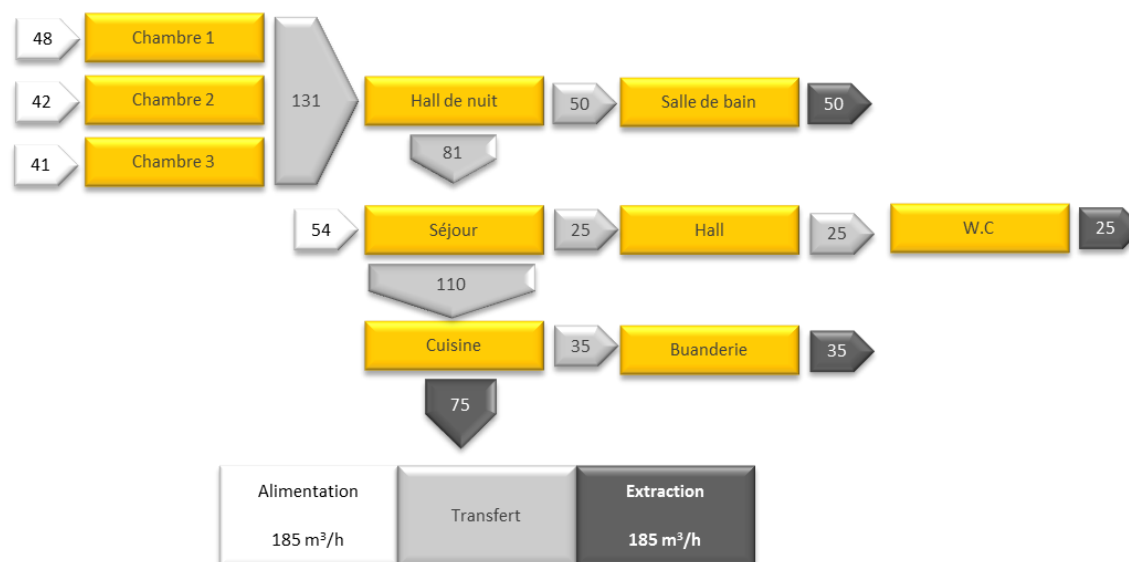


Tableau 13. Table de calcul des débits de ventilation appliqués dans le modèle TRNBuild – Maison B ; Schéma de ventilation appliqué dans le modèle TRNBuild – Maison B

| Maison B | | Caractéristiques des zones ventilées | | | | | Annexe Vde l'Arrêté du Gouvernement Wallon - NBN D50-001 | | | | Débits de ventilation utilisés pour les modèles de simulation | | | Avis de la chambre des métiers du Luxembourg sur la performance énergétique | |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|--|--------------------------|-------------------|-------------------|---|--|-----------------------------------|---|-------------------------|
| ZONES VENTILÉES | | Longueur (m) | Largeur (m) | Hauteur (m) | Volume (m³) | Surface au sol (m²) | Règle générale (m³/h.m²) | Débit nom. requis (m³/h) | Débit min. (m³/h) | Débit max. (m³/h) | Débit théorique (m³/h) | Ajustement des débits pour les modèles TRNSYS (m³/h) | Débit retenu pour TRNBuild (kg/h) | ≥ 0,35 h-1 de renouvellement d'air | Application de la norme |
| Amenée | SEJOUR | 8.2 | 5.0 | 2.5 | 102.1 | 40.8 | 3.6 | 147.0 | 75.0 | 150.0 | 147.0 | 147.0 | 176.4 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 1 | 4.3 | 3.0 | 2.5 | 32.3 | 12.9 | 3.6 | 46.4 | 25.0 | 72.0 | 46.4 | 46.0 | 55.2 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 2 | 4.3 | 3.0 | 2.5 | 31.7 | 12.7 | 3.6 | 45.6 | 25.0 | 72.0 | 45.6 | 45.0 | 54.0 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 3 | 3.9 | 3.0 | 2.5 | 28.7 | 11.5 | 3.6 | 41.3 | 25.0 | 72.0 | 41.3 | 41.0 | 49.2 | 1.4 | Norme respectée |
| <i>Total</i> | | | | | | | | 280.3 | | | 280.3 | 279.0 | 334.8 | | |
| Extraction | CUISINE ouverte | 2.5 | 3.0 | 2.5 | 18.8 | 7.5 | - | - | 75.0 | - | 75.0 | 94.8 | 113.7 | 5.1 | Norme respectée |
| | BUANDERIE | 3.0 | 3.0 | 2.5 | 22.5 | 9.0 | 3.6 | 32.4 | 50.0 | 75.0 | 50.0 | 69.8 | 83.7 | 3.1 | Norme respectée |
| | WC | 1.3 | 0.9 | 2.5 | 2.9 | 1.2 | - | - | 25.0 | - | 25.0 | 44.8 | 53.7 | 15.3 | Norme respectée |
| | BAIN | 2.6 | 3.0 | 2.5 | 19.5 | 7.8 | - | - | 50.0 | - | 25.0 | 69.8 | 83.7 | 3.6 | Norme respectée |
| <i>Total</i> | | | | | | | | 200 | | | 175.0 | 279.0 | 334.8 | | |

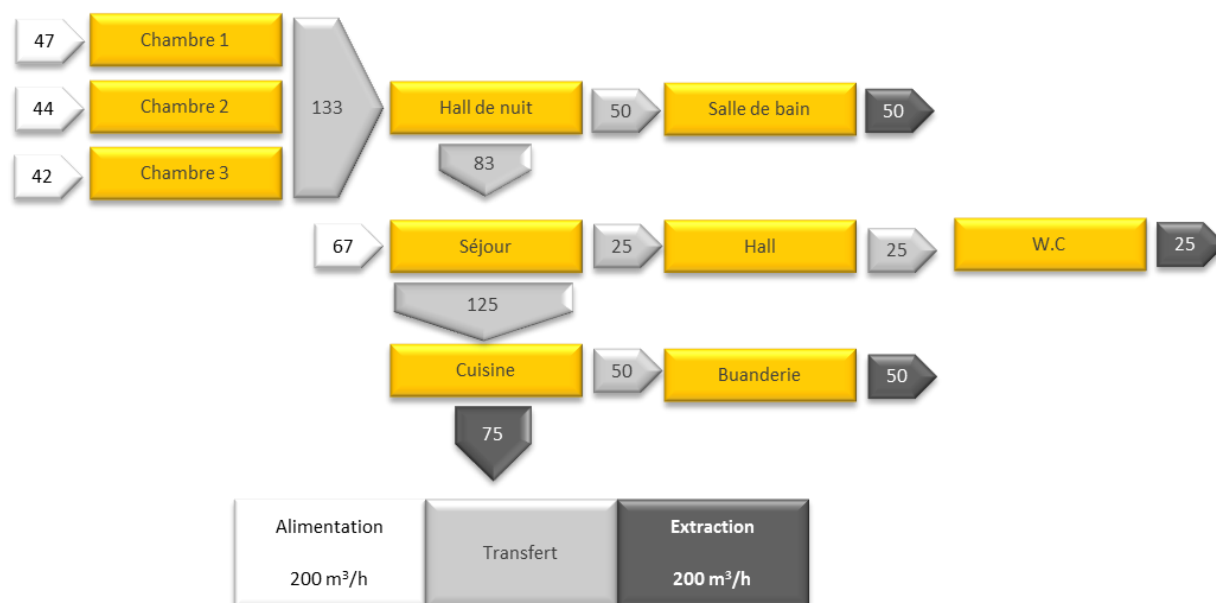


Tableau 14. Table de calcul des débits de ventilation appliqués dans le modèle TRNBuild – Maison C ; Schéma de ventilation appliqué dans le modèle TRNBuild – Maison C

| Maison C | | Caractéristiques des zones ventilées | | | | | Annexe Vde l'Arrêté du Gouvernement Wallon - NBN D50-001 | | | | Débits de ventilation utilisés pour les modèles de simulation | | | Avis de la chambre des métiers du Luxembourg sur la performance énergétique | |
|-----------------|-----------|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|--|--------------------------|-------------------|-------------------|---|--|-----------------------------------|---|-------------------------|
| ZONES VENTILÉES | | Longueur (m) | Largeur (m) | Hauteur (m) | Volume (m³) | Surface au sol (m²) | Règle générale (m³/h.m²) | Débit nom. requis (m³/h) | Débit min. (m³/h) | Débit max. (m³/h) | Débit théorique (m³/h) | Ajustement des débits pour les modèles TRNSYS (m³/h) | Débit retenu pour TRNBuild (kg/h) | ≥ 0,35 h-1 de renouvellement d'air | Application de la norme |
| Amenée | SEJOUR | 11.0 | 3.7 | 2.6 | 103.8 | 40.7 | 3.6 | 146.5 | 75.0 | 150.0 | 146.5 | 146.0 | 175.2 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 1 | 3.7 | 3.7 | 2.6 | 35.0 | 13.7 | 3.6 | 49.4 | 25.0 | 72.0 | 49.4 | 49.0 | 58.8 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 2 | 3.6 | 3.7 | 2.6 | 33.5 | 13.1 | 3.6 | 47.3 | 25.0 | 72.0 | 47.3 | 47.0 | 56.4 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 3 | 3.5 | 3.7 | 2.6 | 33.2 | 13.0 | 3.6 | 46.9 | 25.0 | 72.0 | 46.9 | 46.0 | 55.2 | 1.4 | Norme respectée |
| <i>Total</i> | | | | | | | | 290.1 | | | 290.1 | 288.0 | 345.6 | | |
| Extraction | CUISINE | 3.7 | 2.8 | 2.6 | 26.1 | 10.2 | - | - | 50.0 | - | 50.0 | 78.3 | 93.9 | 3.0 | Norme respectée |
| | HALL | 7.2 | 2.8 | 2.6 | 50.5 | 19.8 | 3.6 | 71.3 | 25.0 | 75.0 | 25.0 | 53.3 | 63.9 | 1.1 | Norme respectée |
| | SDB 1 | 2.6 | 2.8 | 2.6 | 18.2 | 7.1 | - | - | 50.0 | - | 50.0 | 78.3 | 93.9 | 4.3 | Norme respectée |
| | SDB 2 | 3.5 | 2.8 | 2.6 | 24.7 | 9.7 | - | - | 50.0 | - | 50.0 | 78.3 | 93.9 | 3.2 | Norme respectée |
| <i>Total</i> | | | | | | | | 175 | | | 175.0 | 288.0 | 345.6 | | |

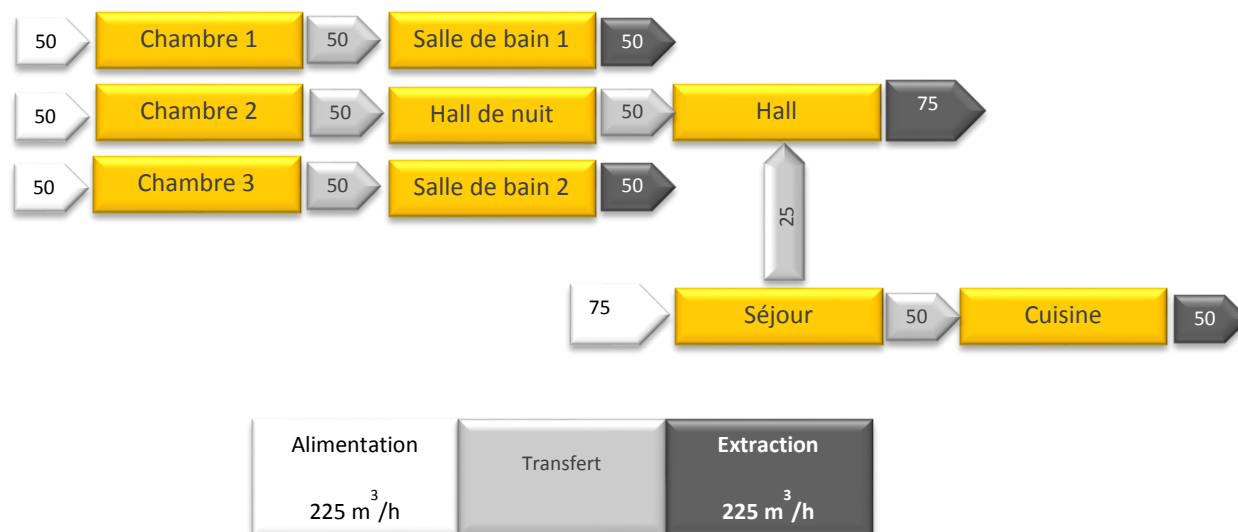
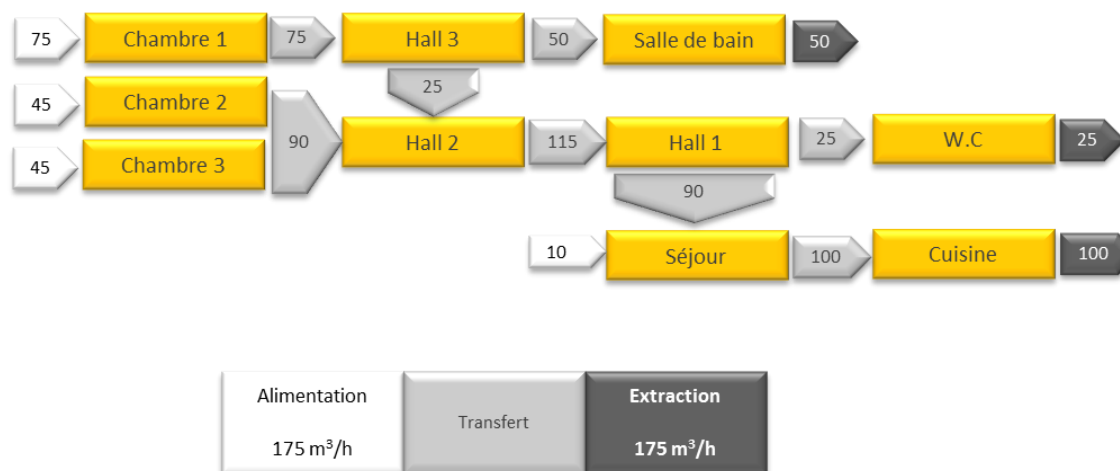


Tableau 15. Table de calcul des débits de ventilation appliqués dans le modèle TRNBuild – Maison D ; Schéma de ventilation appliqué dans le modèle TRNBuild – Maison D

| Maison D | | Caractéristiques des zones ventilées | | | | | Annexe Vde l'Arrêté du Gouvernement Wallon - NBN D50-001 | | | | Débits de ventilation utilisés pour les modèles de simulation | | | Avis de la chambre des métiers du Luxembourg sur la performance énergétique | |
|-----------------|-----------|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|--|--------------------------|-------------------|-------------------|---|--|-----------------------------------|---|-------------------------|
| ZONES VENTILÉES | | Longueur (m) | Largeur (m) | Hauteur (m) | Volume (m³) | Surface au sol (m²) | Règle générale (m³/h.m²) | Débit nom. requis (m³/h) | Débit min. (m³/h) | Débit max. (m³/h) | Débit théorique (m³/h) | Ajustement des débits pour les modèles TRNSYS (m³/h) | Débit retenu pour TRNBuild (kg/h) | ≥ 0,35 h-1 de renouvellement d'air | Application de la norme |
| Amenée | SEJOUR | 3.8 | 3.7 | 2.5 | 35.2 | 14.1 | 3.6 | 50.6 | 75.0 | 150.0 | 75.0 | 50.0 | 60 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 1 | 5.1 | 4.1 | 2.5 | 51.1 | 20.5 | 3.6 | 73.6 | 25.0 | 72.0 | 73.6 | 73.0 | 87.6 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 2 | 4.1 | 3.0 | 2.5 | 30.4 | 12.2 | 3.6 | 43.7 | 25.0 | 72.0 | 43.7 | 43.0 | 51.6 | 1.4 | Norme respectée |
| | CHAMBRE 3 | 3.5 | 4.5 | 2.5 | 38.8 | 15.5 | 3.6 | 55.9 | 25.0 | 72.0 | 55.9 | 55.0 | 66 | 1.4 | Norme respectée |
| <i>Total</i> | | | | | | | | 223.9 | | | 248.3 | 221.0 | 265.2 | | |
| Extraction | CUISINE | | | 2.5 | 72.8 | 28.9 | - | - | 75.0 | - | 75.0 | 86.5 | 103.8 | 1.2 | Norme respectée |
| | HALL | 5.2 | 4.0 | 2.5 | 52.4 | 21.0 | 3.6 | 75.5 | 25.0 | 75.0 | 25.0 | 36.5 | 43.8 | 0.7 | Norme respectée |
| | SDB | 7.2 | 2.4 | 2.5 | 42.9 | 17.2 | - | - | 50.0 | - | 50.0 | 61.5 | 73.8 | 1.4 | Norme respectée |
| | W.C | 1.1 | 2.0 | 2.5 | 5.3 | 2.1 | - | - | 25.0 | - | 25.0 | 36.5 | 43.8 | 7.0 | Norme respectée |
| <i>Total</i> | | | | | | | | 175 | | | 175.0 | 221.0 | 265.2 | | |



Ventilation : calculs des consommations électriques

Les débits d'alimentation en air neuf des 4 modèles de maisons sont les suivants :

| Modèle | Débit (m ³ /h) |
|----------|---------------------------|
| Maison A | 185 |
| Maison B | 200 |
| Maison C | 225 |
| Maison D | 175 |

Tableau 16. Débits d'air neuf - modèles VallEnergie

Un groupe de ventilation double flux a été choisi [19] pour pouvoir répondre aux besoins en air neuf des 4 modèles à la fois, ceci pour des raisons de simplification des hypothèses et de comparaison des modèles entre eux. Le système choisi est composé de deux ventilateurs ayant chacun une puissance de 73 Watts. La récupération de chaleur pour le système présente l'efficacité suivante :

| Pour un débit : | Efficacité |
|-------------------------|------------|
| < 150 m ³ /h | 88 % |
| < 201 m ³ /h | 86 % |
| < 251 m ³ /h | 85 % |
| < 276 m ³ /h | 83 % |

Tableau 17. Efficacités de l'échangeur de chaleur en fonction des débits des ventilateurs

L'efficacité retenue pour les simulations est de 80 %.

Le poste de consommation énergétique dû à la ventilation est intégré au calcul du bilan annuel en énergie [9]. Le calcul de cette consommation électrique est réalisé sur base de l'hypothèse que la ventilation fonctionne en continu toute l'année dans les 4 modèles.

consommation électrique annuelle pour la ventilation = Puissance × durée de fonctionnement

$$\text{consommation électrique} = \frac{(73 * 2) * 8760}{1000} = 1279 \text{ kWh/an}$$

La consommation électrique annuelle des deux ventilateurs du système double flux est donc de 1279 kWh/an. Cette valeur de consommation est retenue pour les calculs des bilans énergétiques de chaque modèle.

Critères : Maison E+

Critère énergétique

La performance énergétique des maisons est évaluée sur base d'un bilan annuel en énergie primaire, tel que décrit dans le CDC du projet. De plus, les maisons doivent respecter au minimum le critère de la maison passive concernant le besoin net pour le chauffage, celui-ci ne devant pas excéder la valeur de 15 kWh/m².an. Pour comparer les maisons en fonction des systèmes simulés et de la performance atteinte, une légende a été mise en place :




-  Maison E+ : présente un bilan annuel en énergie primaire positif
-  Maison passive : présente un besoin net annuel pour le chauffage ≤ 15 kWh/an.m²
-  Maison standard : dépasse les valeurs de besoin net annuel pour le chauffage du critère passif

Figure 11. Légende des critères de performance énergétique des maisons

Critère écologique

La performance des maisons s'exprime également sur le plan environnemental. Il s'agit de déterminer la quantité de gaz à effet de serre émise au cours d'une année d'exploitation. L'exigence d'un critère passif au minimum pour les 4 maisons signifie que leur consommation est faible à la base. Par conséquent, les émissions de GES résultant de cette consommation seront également peu élevées.

Le site internet : <http://maisons-prestige.com> donne à titre d'exemple les valeurs suivantes d'émissions de GES pour différents types d'habitation (Figure 12) :

- « - une maison passive émettra moins de 1 kg_{éqCO2}/m².an
- une maison RT2012 peut émettre jusqu'à 20 kg_{éqCO2}/m².an
- une maison des années 70 émet en moyenne plus de 80 kg_{éqCO2}/m².an »

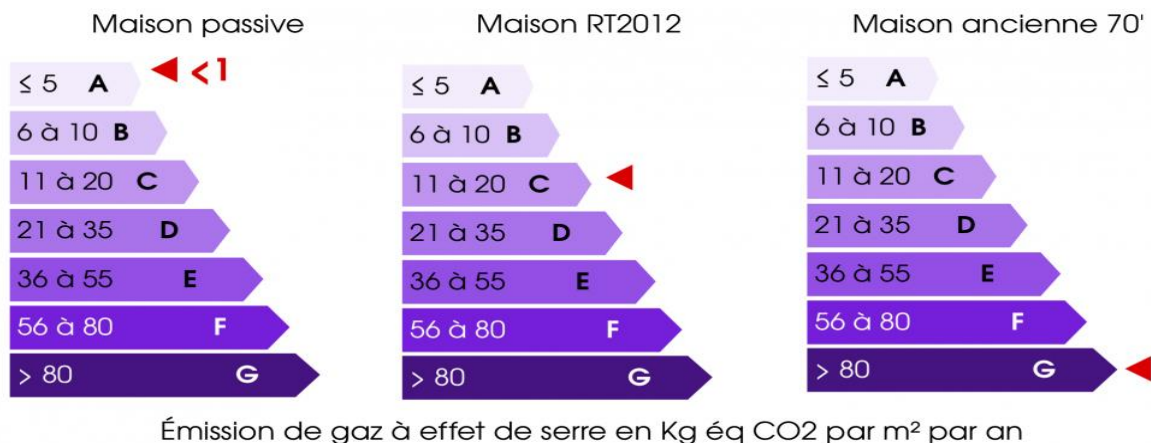


Figure 12. Valeurs des émissions de gaz à effet de serre pour différents types de constructions (France)

Source : <http://maisons-prestige.com>

Pour comparer les modèles, la quantité de CO₂ émise au cours d'une année de simulation sera évaluée en fonction du vecteur énergétique (facteur d'émissions en CO₂ en RW [20]), des systèmes énergétiques et des consommations annuelles résultantes.

Critère économique

Les mesures prises atteindre le critère maisons E+ du projet ne doivent pas engendrer un coût supérieur à 1600 €/m². Ceci correspond à la limite fixée par le CDC du projet.

Modèle de simulation : maison A

Informations générales

| Informations générales – Modèle A | |
|---|---|
| Localisation | Belgique (Heinstert) |
| Orientation | 349° SUD (entrée) 169° NORD (jardin) |
| Type | neuf |
| Type constructif | massif |
| Matériau constructif | Brique |
| Matériau isolant | polystyrène expansé enrichi de graphite |
| Vitrage | triple |
| Ventilation | VMC double flux |
| Taux d'infiltration n50 [h-1] | 0.6 |
| Taux d'infiltration encodé [h-1] | 0.03 |
| Occupation (nb. Occupants) | 4 |
| Consigne de température (jour/nuit) | 20/16 |
| Surface de plancher chauffé | 144.24 |
| Critère passif [kWh/an] (15kWh/an.m ² pour le chauffage) | 2164 |
| Nombre de zones | 12 |
| Nombre de zones chauffées | 7 |
| Nombre de zones non-chauffées | 5 |

Tableau 18. Caractéristiques générales - Modèle A

Valeurs U des parois : opaques et translucides

| Type de paroi | Valeur U [W/m ² K] |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Paroi extérieure | 0.107 |
| Dalle de sol | 0.120 |
| Mur intérieur porteur | 3.228 |
| Mur intérieur non-porteur | 3.629 |
| Toiture inclinée isolée | 0.107 |
| Toiture inclinée non-isolée | 0.230 |
| Plancher isolé | 0.104 |
| Mur mitoyen | 0.134 |

Tableau 19. Valeurs U des parois - Modèle A

Caractéristiques des vitrages

| | Type TRNSYS encodé (Id number) | U vitrage [W/m ² K] | Facteur solaire g | Pourcentage de châssis sur surface totale |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|--|
| Fenêtre de façade | 13007 | 0.584 | 0.59 | 30 % |
| Fenêtre de toiture | 12008 | 0.451 | 0.59 | 30 % |

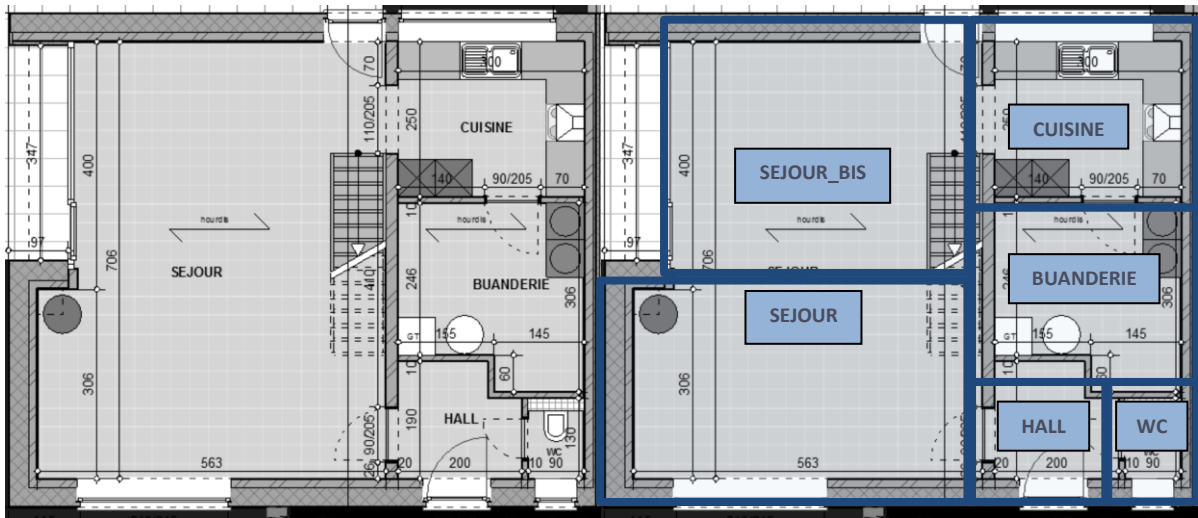
Tableau 20. Données sur les vitrages - Modèle A

Liste des surfaces transparentes

| Zone | Orientation | ID fenêtre | Surface fenêtre m ² | Protections solaires O/N |
|--------------|-------------|------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Séjour | S_0_90 | 13007 | 5.16 | O |
| Séjour bis | N_180_90 | 13007 | 1.94 | N |
| Séjour bis | W_90_90 | 13007 | 7.36 | N |
| Hall | S_0_90 | 13007 | 2.15 | N |
| W.C | S_0_90 | 13007 | 0.48 | N |
| Cuisine | N_180_90 | 13007 | 1.59 | N |
| Chambre 1 | N_180_90 | 13007 | 2.45 | N |
| Chambre 2 | W_90_90 | 13007 | 7.21 | N |
| Chambre 3 | S_0_90 | 13007 | 2.16 | O |
| Hall de nuit | N_180_90 | 13007 | 0.9 | N |
| Hall de nuit | N_180_35 | 12008 | 0.9 | N |
| Bain | S_0_35 | 12008 | 0.93 | O |

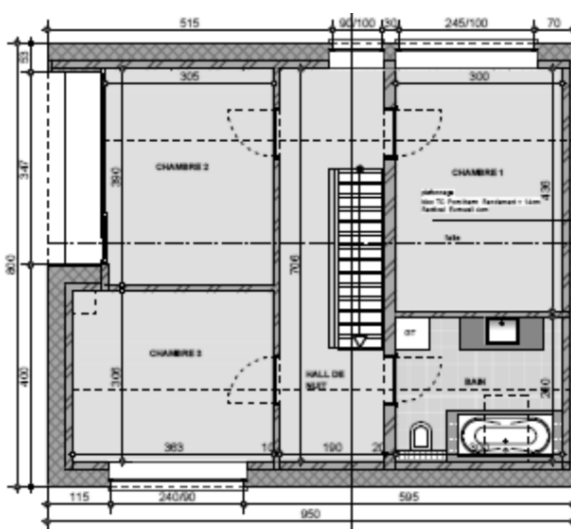
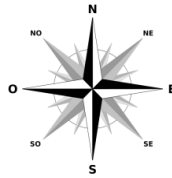
Tableau 21. Surfaces transparentes - Modèle A

Plans et zonage pour intégration du modèle Sketchup 3D dans logiciel encodage TRNBuild

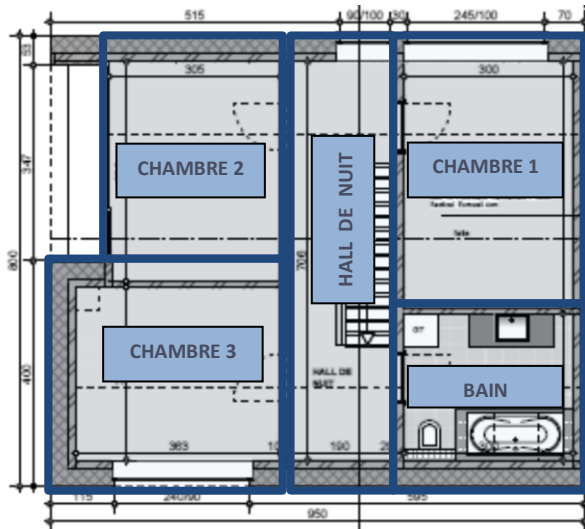


Plan initial - RDC

Plan zoné - RDC



















Plan initial – 1^{er} étage



Plan zoné – 1^{er} étage

Figure 13. Plans d'architecte et zonage - Modèle A

Synthèse des gains internes et type de ventilation encodés pour chaque zone du modèle :

| ZONE | GAINS ENCODÉS | VENTILATION ENCODÉE |
|--|---|---|
| Zones chauffées - RDC | | |
| SEJOUR |  |  |
| SEJOUR BIS |  |  |
| CUISINE |  |  |
| Zones non chauffées - RDC | | |
| BUANDERIE | - |  |
| W.C | - |  |
| HALL | - | - |
| Zones chauffées – 1^{er} étage | | |
| CHAMBRE 1 |  |  |
| CHAMBRE 2 |  |  |
| CHAMBRE 3 |  |  |
| BAIN |  |  |
| Zone non chauffée – 1^{er} étage | | |
| HALL DE NUIT | - | - |
| Zone non chauffée – 2^{ème} étage | | |
| COMBLES | - | - |







 Appareils électroménagers
  Éclairage
  Occupation
  Ventilation : alimentation d'air neuf
  Ventilation : extraction d'air vicié
  Ventilation nocturne

Tableau 22. Table des gains internes et ventilation encodés - Modèle A

Modèle de simulation : maison B

Informations générales

| Informations générales – Modèle B | |
|---|---|
| Localisation | Belgique (Heinstert) |
| Orientation | 349° SUD (entrée) 169° NORD (jardin) |
| Type | neuf |
| Type constructif | léger |
| Matériau constructif | bois |
| Matériau isolant | cellulose |
| Vitrage | triple |
| Ventilation | VMC double flux |
| Taux d'infiltration n50 [h-1] | 0.6 |
| Taux d'infiltration encodé [h-1] | 0.03 |
| Occupation (nb. Occupants) | 4 |
| Consigne de température (jour/nuit) | 20/16 |
| Surface de plancher chauffé | 156.38 |
| Critère passif [kWh/an] (<i>15kWh/an.m² pour le chauffage</i>) | 2346 |
| Nombre de zones | 11 |
| Nombre de zones chauffées | 6 |
| Nombre de zones non-chauffées | 5 |

Tableau 23. Caractéristiques générales - Modèle B

Valeurs U des parois : opaques et translucides

| Type de paroi | Valeur U [W/m ² K] |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Paroi extérieure | 0.113 |
| Dalle de sol | 0.12 |
| Mur intérieur porteur | 0.334 |
| Mur intérieur non-porteur | 0.489 |
| Toiture inclinée isolée | 0.134 |
| Toiture inclinée non-isolée | 0.437 |
| Plancher isolé | 0.119 |
| Mur mitoyen | 0.131 |

Tableau 24. Valeurs U des parois - Modèle B

Caractéristiques des vitrages

| | Type TRNSYS encodé (Id number) | U vitrage [W/m ² K] | Facteur solaire g | Pourcentage de châssis sur surface totale |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|--|
| Fenêtre de façade | 13007 | 0.584 | 0.59 | 30 % |
| Fenêtre de toiture | 12008 | 0.451 | 0.59 | 30 % |

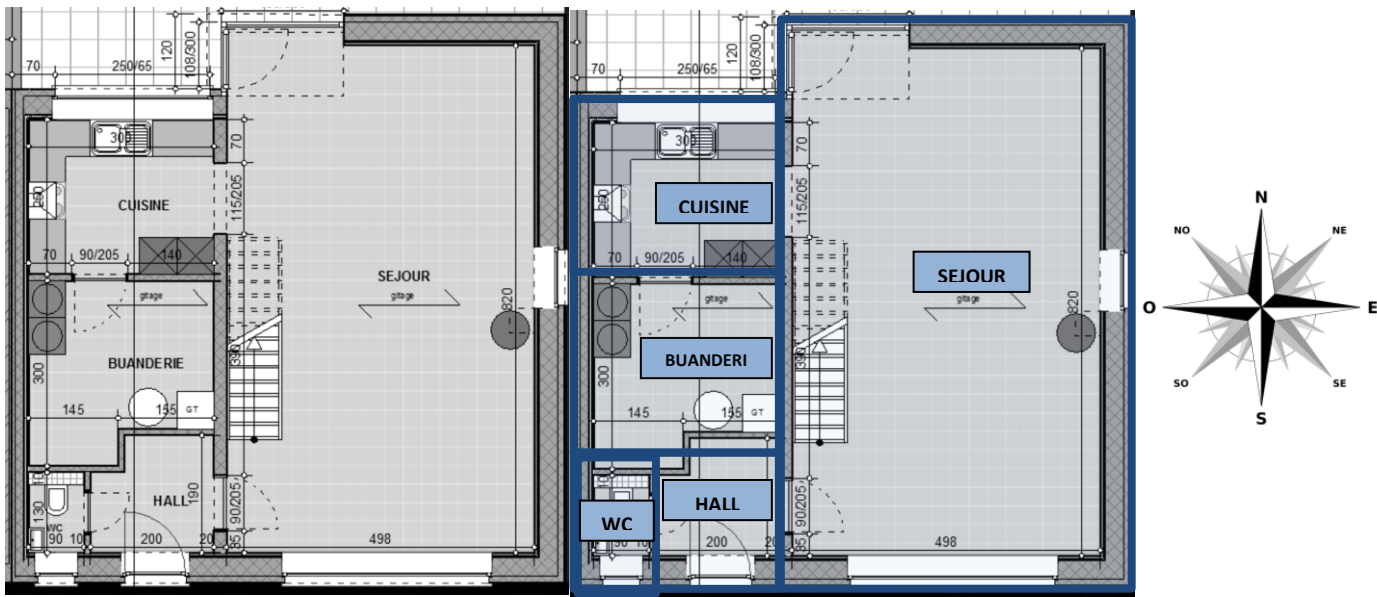
Tableau 25. Données sur les vitrages - Modèle B

Liste des surfaces transparentes

| Zone | Orientation | ID fenêtre | Surface fenêtre m ² | Protections solaires O/N |
|--------------|-------------|------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Séjour | S_0_90 | 13007 | 4.29 | O |
| Séjour | E_270_90 | 13007 | 1.94 | N |
| Séjour | N_180_90 | 13007 | 4.99 | N |
| Séjour | W_90_90 | 13007 | 2.72 | N |
| Cuisine | N_180_90 | 13007 | 1.63 | N |
| Hall | S_0_90 | 13007 | 2.15 | N |
| W.C | S_0_90 | 13007 | 2.81 | N |
| Chambre 1 | N_180_90 | 13007 | 2.50 | N |
| Chambre 2 | E_270_90 | 13007 | 0.9 | N |
| Chambre 2 | N_180_35 | 12008 | 1.20 | N |
| Chambre 3 | S_0_90 | 13007 | 2.11 | O |
| Hall de nuit | N_180_90 | 13007 | 0.95 | N |
| Hall de nuit | S_0_90 | 13007 | 0.85 | O |
| Hall de nuit | N_180_35 | 12008 | 0.96 | N |
| Bain | S_0_35 | 12008 | 0.96 | O |

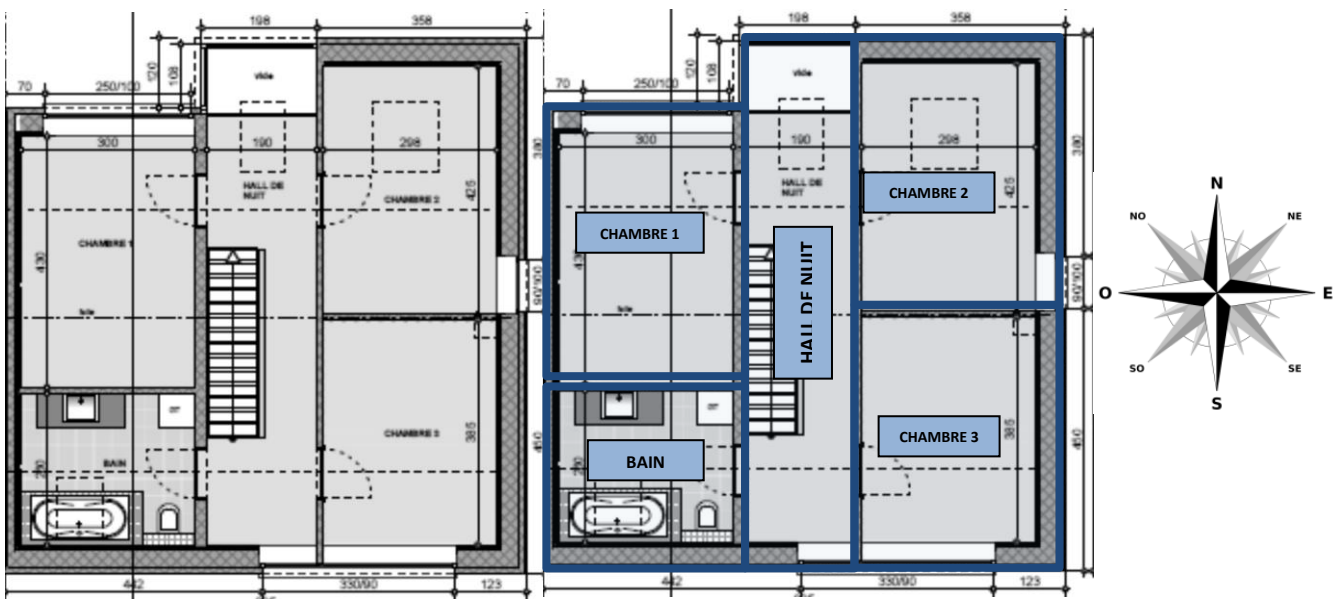
Tableau 26. Surfaces transparentes - Modèle B

Plans et zonage pour intégration du modèle Sketchup 3D dans logiciel encodage TRNBuild



Plan initial - RDC

Plan zoné - RDC

















Plan initial – 1^{er} étage

Plan zoné – 1^{er} étage

Figure 14. Plans d'architecte et zonage - Modèle B

Synthèse des gains internes et type de ventilation encodés pour chaque zone du modèle :

| ZONE | GAINS ENCODÉS | VENTILATION ENCODÉE |
|--|---|---|
| Zones chauffées - RDC | | |
| SEJOUR |  |  |
| CUISINE |  |  |
| Zones non chauffées - RDC | | |
| BUANDERIE | - |  |
| W.C | - |  |
| HALL | - | - |
| Zones chauffées – 1^{er} étage | | |
| CHAMBRE 1 |  |  |
| CHAMBRE 2 |  |  |
| CHAMBRE 3 |  |  |
| BAIN |  |  |
| Zone non chauffée – 1^{er} étage | | |
| HALL DE NUIT | - | - |
| Zone non chauffée – 2^{ème} étage | | |
| COMBLES | - | - |





 Appareils électroménagers
  Éclairage
  Occupation
  Ventilation : alimentation d'air neuf
  Ventilation : extraction d'air vicié
  Ventilation nocturne

Tableau 27. Table des gains internes et ventilation encodés - Modèle B

Modèle de simulation : maison C

Informations générales

| Informations générales – Modèle C | |
|---|--|
| Localisation | Luxembourg (Noerdange) |
| Orientation | 20° SUD (entrée) 200° NORD (jardin) |
| Type | neuf |
| Type constructif | léger |
| Matériau constructif | bois |
| Matériau isolant | cellulose |
| Vitrage | triple |
| Ventilation | VMC double flux |
| Taux d'infiltration n50 [h-1] | 0.6 |
| Taux d'infiltration encodé [h-1] | 0.03 |
| Occupation (nb. Occupants) | 4 |
| Consigne de température (jour/nuit) | 20/16 |
| Surface de plancher chauffé | 211 |
| Critère passif [kWh/an] (<i>15kWh/an.m² pour le chauffage</i>) | 3165 |
| Nombre de zones | 11 |
| Nombre de zones chauffées | 7 |
| Nombre de zones non-chauffées | 4 |

Tableau 28. Caractéristiques générales - Modèle C

Valeurs U des parois : opaques et translucides

| Type de paroi | Valeur U [W/m ² K] |
|---------------------------|----------------------------------|
| Paroi extérieure | 0.101 |
| Dalle de sol | 0.134 |
| Mur intérieur porteur | 0.243 |
| Mur intérieur non-porteur | 0.383 |
| Toiture inclinée isolée | 0.110 |
| Toiture plate | 0.108 |
| Plancher isolé | 0.132 |
| Mur mitoyen | 0.186 |

Tableau 29. Valeurs U des parois - Modèle C

Caractéristiques des vitrages

| | Type TRNSYS encodé (Id number) | U vitrage [W/m ² K] | Facteur solaire g | Pourcentage de châssis sur surface totale |
|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|--|
| Fenêtre | 13006 | 0.520 | 0.585 | 30 % |

Tableau 30. Données sur les vitrages - Modèle C

Liste des surfaces transparentes

| Zone | Orientation | ID fenêtre | Surface fenêtre m ² | Protections solaires O/N |
|-----------|-------------|------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Séjour | N_180_90 | 13006 | 2.63 | N |
| Séjour | N_180_90 | 13006 | 2.63 | N |
| Séjour | W_90_90 | 13006 | 2.70 | O |
| Séjour | W_90_90 | 13006 | 2.03 | N |
| Séjour | S_0_90 | 13006 | 2.70 | O |
| Séjour | S_0_90 | 13006 | 1.08 | O |
| Cuisine | N_180_90 | 13006 | 2.35 | N |
| Hall | S_0_90 | 13006 | 1.18 | N |
| Chambre 1 | N_180_90 | 13006 | 1.88 | N |
| Chambre 1 | W_90_90 | 13006 | 0.78 | N |
| Chambre 2 | W_90_90 | 13006 | 1.95 | N |
| Chambre 3 | S_0_90 | 13006 | 1.08 | O |
| Chambre 3 | S_0_90 | 13006 | 2.03 | O |
| SDB 1 | N_180_90 | 13006 | 1.25 | N |
| SDB 2 | S_0_90 | 13006 | 2.03 | O |
| Combles | W_90_90 | 13006 | 1.95 | N |
| Combles | N_180_50 | 13006 | 0.80 | N |

Tableau 31. Surfaces transparentes - Modèle C

Plans et zonage pour intégration du modèle Sketchup 3D dans logiciel encodage TRNBuild



Plan initial - RDC

Plan zoné - RDC



















Plan initial – 1^{er} étage

Plan zoné – 1^{er} étage

Figure 15. Plans d'architecte et zonage - Modèle C

Synthèse des gains internes et type de ventilation encodés pour chaque zone du modèle :

| ZONE | GAINS ENCODÉS | VENTILATION ENCODÉE |
|--|---|---|
| Zones chauffées - RDC | | |
| SEJOUR |  |  |
| HALL |  |  |
| Zones non chauffées - RDC | | |
| CUISINE |  |  |
| RÉSERVE | - | - |
| Zones chauffées – 1 ^{er} étage | | |
| CHAMBRE 1 |  |  |
| CHAMBRE 2 |  |  |
| CHAMBRE 3 |  |  |
| SDB 1 |  |  |
| SDB 2 |  |  |
| Zone non chauffée – 1 ^{er} étage | | |
| HALL DE NUIT | - | - |
| Zone non chauffée – 2 ^{ème} étage | | |
| COMBLES | - | - |







 Appareils électroménagers
  Éclairage
  Occupation
  Ventilation : alimentation d'air neuf
  Ventilation : extraction d'air vicié
  Ventilation nocturne

Tableau 32. Table des gains internes et ventilation encodés - Modèle C

Modèle de simulation : maison D

Informations générales

| Informations générales- Modèle D | |
|---|---|
| Localisation | Luxembourg (Boevange) |
| Orientation | 262° EST (entrée) 82° OUEST (jardin) |
| Type | neuf |
| Type constructif | léger |
| Matériau constructif | bois |
| Matériau isolant | cellulose |
| Vitrage | triple |
| Ventilation | VMC double flux |
| Taux infiltration n50 [h-1] | 0.60 |
| Taux d'infiltration encodé [h-1] | 0.03 |
| Occupation (nb. Occupants) | 4 |
| Consigne de température (jour/nuit) | 20/16 |
| Surface de plancher chauffé | 178.19 |
| Critère passif [kWh/an] (<i>15kWh/an.m² pour le chauffage</i>) | 2673 |
| Nombre de zones | 12 |
| Nombre de zones chauffées | 6 |
| Nombre de zones non-chauffées | 6 |

Tableau 33. Caractéristiques générales - Modèle D

Valeurs U des parois : opaques et translucides

| Type de paroi | Valeur U [W/m ² K] |
|---------------------------|----------------------------------|
| Paroi extérieure | 0.101 |
| Dalle de sol | 0.134 |
| Mur intérieur porteur | 0.243 |
| Mur intérieur non-porteur | 0.383 |
| Toiture inclinée isolée | 0.110 |
| Plancher isolé | 0.132 |
| Mur mitoyen | 0.186 |

Tableau 34. Valeurs U des parois - Modèle D

Caractéristiques des vitrages

| | Type TRNSYS encodé (Id number) | U vitrage [W/m ² K] | Facteur solaire g | Pourcentage de châssis sur surface totale |
|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|--|
| Fenêtre | 13006 | 0.520 | 0.585 | 30 % |

Tableau 35. Données sur les vitrages - Modèle D

Liste des surfaces transparentes

| Zone | Orientation | ID fenêtre | Surface fenêtre m ² | Protections solaires O/N |
|-----------|-------------|----------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Séjour | S_0_90 | 13006 | 4.29 | O |
| Séjour | W_0_90 | 13006 | 5.50 | N |
| Cuisine | W_0_90 | 13006 | 5.50 | N |
| Cuisine | S_0_90 | 13006 | 2.64 | O |
| W.C | E_270_90 | 13006 | 0.40 | N |
| Chambre 1 | W_0_90 | 13006 | 3.5 | O |
| Chambre 2 | E_270_90 | 13006 | 4.00 | N |
| Chambre 3 | E_270_90 | 13006 <td 4.00 | N | |
| Hall 3 | W_0_90 | 13006 | 1.40 | N |
| Bain | S_0_90 | 13006 | 1.40 | O |
| Bain | W_0_90 | 13006 | 1.40 | O |

Tableau 36. Surfaces transparentes - Modèle D

Plans et zonage pour intégration du modèle Sketchup 3D dans logiciel encodage TRNBuild

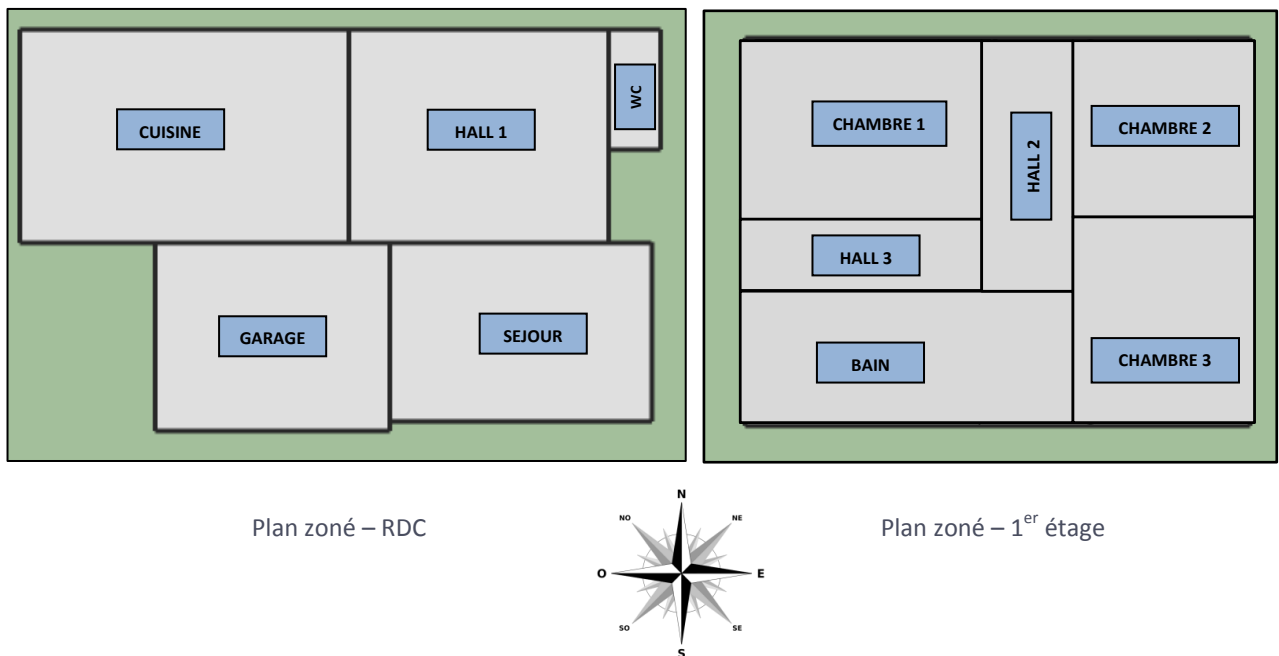


















Figure 16. Plans d'architecte et zonage - Modèle D

Synthèse des gains internes et type de ventilation encodés pour chaque zone du modèle :

| ZONE | GAINS ENCODÉS | VENTILATION ENCODÉE |
|--|---|---|
| Zones chauffées - RDC | | |
| SEJOUR |  |  |
| CUISINE |  |  |
| Zones non chauffées - RDC | | |
| HALL 1 |  | - |
| W.C | - |  |
| GARAGE | - | - |
| Zones chauffées – 1^{er} étage | | |
| CHAMBRE 1 |  |  |
| CHAMBRE 2 |  |  |
| CHAMBRE 3 |  |  |
| BAIN |  |  |
| Zone non chauffée – 1^{er} étage | | |
| HALL 2 |  | - |
| HALL 3 |  | - |
| Zone non chauffée – 2^{ème} étage | | |
| COMBLES | - | - |







 Appareils électroménagers
  Éclairage
  Occupation
  Ventilation : alimentation d'air neuf
  Ventilation : extraction d'air vicié
  Ventilation nocturne

Tableau 37. Table des gains internes et ventilation encodés - Modèle D

Etude de l'enveloppe

L'enveloppe du bâtiment est la première barrière contre les déperditions thermiques. Son rôle est ainsi déterminant pour la performance des différents modèles. C'est pourquoi plusieurs simulations ont été menées afin de tester certains paramètres de l'enveloppe et juger de leur impact sur la performance globale des quatre maisons.

Valeurs maximales de coefficients U selon la norme PEB

La première variante de simulation consiste à faire varier le coefficient de transmission thermique U dans les différentes parois du modèle. Cette étude a été effectuée pour le modèle A du projet. Les valeurs maximales de coefficients de transmission thermique « U » des parois exigées par la norme PEB en Wallonie (Tableau 38) ont été appliquées dans ce modèle et comparées à un modèle de référence et à un modèle passif.

| Parois du volume protégé | U _{max} [W/m²K] | R _{min} [m²K/W] |
|--|--------------------------|--------------------------|
| Toitures et plafonds | 0,24 | |
| Fenêtres Vitrages | 1,80 1,10 | |
| Portes et portes de garage | 2,00 | |
| Façades légères Vitrages | 2,00 1,10 | |
| Murs - extérieurs ou tout autre environnement sauf sol, cave, vide sanitaire - en contact avec vide sanitaire ou cave - en contact avec le sol | 0,24 | 1,40 1,50 |
| Briques de verre | 2,00 | |
| Planchers - en contact avec l'extérieur ou un espace adjacent non chauffé - sur sol, vide sanitaire, cave | 0,30 0,30* | 1,75 |
| Parois mitoyennes | 1 | |

* La valeur U tient compte de la résistance thermique du sol, conformément aux spécifications fournies à l'annexe C1 de l'AGW 15.05.2014.

Tableau 38. Tableau des exigences de valeurs U max (portail de l'énergie en Wallonie : www.energie.wallonie.be)

La réglementation PEB impose des valeurs maximales de coefficient de transmission thermique U en W/m²K. Toutes les maisons du projet VallEnergie respectent bien entendu ce critère, et les valeurs U atteintes dans les différentes parois des maisons sont mêmes bien inférieures aux limites prescrites par la norme belge. Le but de cette simulation est de comparer à partir de l'un des modèles, le modèle A, la consommation annuelle pour le chauffage dans le cas d'un modèle de référence, et dans le cas d'un modèle respectant strictement les valeurs de coefficient U selon la législation PEB. Le tableau suivant compare les valeurs U entre le modèle de référence pour la maison A (valeurs définies par le travail des architectes et encodées pour les simulations - Tableau 39), les valeurs U maximales de la norme PEB et enfin les valeurs U encodées pour le modèle servant de comparaison avec le modèle de référence si la maison respectait strictement la norme.

| Paroi | U (W/m²K) | Umax* (W/m²K) *Selon la réglementation PEB | U encodé dans TRNBuild (W/m²K) |
|-------------------------------|-----------|--|-----------------------------------|
| Murs extérieurs | 0.107 | 0.240 | 0.240 |
| Toiture inclinée | 0.107 | 0.240 | 0.240 |
| Plafond isolé (étage/combles) | 0.104 | 0.240 | 0.238 |
| Dalle de sol | 0.120 | 0.300 | 0.244 |
| Paroi mitoyenne | 0.134 | 1.000 | 1.000 |
| Vitrage | 0.590 | 1.800 | 1.430 |

Tableau 39. Valeurs U du modèle A comparées aux valeurs maximales de la norme PEB

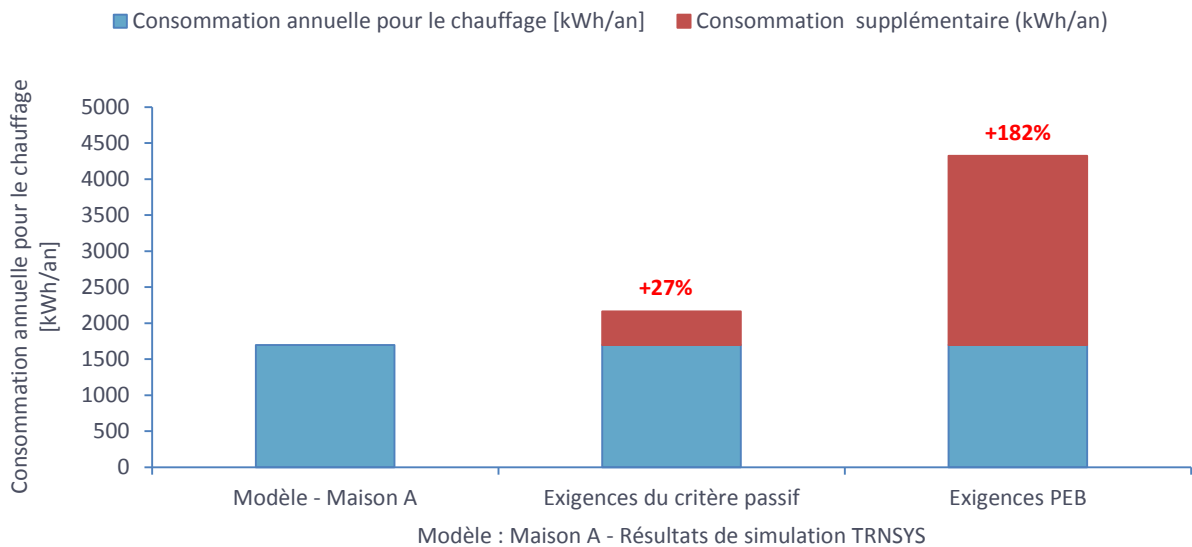


Figure 17. Impact des valeurs U des parois (W/m^2K) : exigences de la norme PEB appliquées

Le graphique ci-dessus (Figure 17) illustre les résultats obtenus pour cette comparaison. Le modèle A de référence reprend les hypothèses de base mentionnées précédemment (profil de gains internes, ventilation, taux d'infiltration, etc...). La production de chauffage est considérée instantanée avec une puissance illimitée ce qui permet de répondre complètement à la demande du bâtiment dans la simulation (les pertes thermiques à travers l'enveloppe sont instantanément compensées par le système de chauffage). Cette hypothèse pour le chauffage est retenue pour les 3 cas simulés ici. Le deuxième résultat – « exigences du critère passif »- représente la consommation annuelle de chauffage pour ce modèle A mais en critère passif. Pour obtenir ce résultat, le besoin net pour le chauffage autorisé par le critère de la maison passive, $15kWh/m^2.an$, a été multiplié par la surface de plancher chauffée du modèle, soit ici pour le modèle A : $144.24m^2$. De ce fait la consommation annuelle de chauffage du modèle en passif est de 2164 kWh/an (le rendement du système est considéré également à 100 %). Cette valeur représente 27 % d'énergie en plus par rapport au modèle de référence, dont la consommation pour le chauffage est estimée à 1696 kWh/an.

Enfin, l'application des valeurs maximales de coefficient U, selon la norme PEB, dans les parois du modèle, est à l'origine d'une augmentation considérable de la consommation d'énergie annuelle pour le chauffage. Celle-ci, par rapport à la référence, représente 182 % d'augmentation, soit une consommation annuelle de 4793 kWh/an comparés à 1696 kWh/an pour la référence.

Cette première analyse démontre l'importance de la performance de l'enveloppe sur la consommation d'énergie du bâtiment pour le chauffage.

Variation de l'épaisseur d'isolation et détermination de l'épaisseur minimale d'isolation pour atteindre le critère passif

L'épaisseur d'isolation a été modifiée par pas de 5 cm entre chaque simulation pour évaluer son impact sur le besoin net annuel pour le chauffage. Les résultats obtenus sont comparés avec le besoin annuel maximal pour le chauffage autorisé par le critère passif. Cette comparaison permet d'estimer quelle serait l'épaisseur minimale d'isolant requise pour respecter ce critère.

Modèle A :

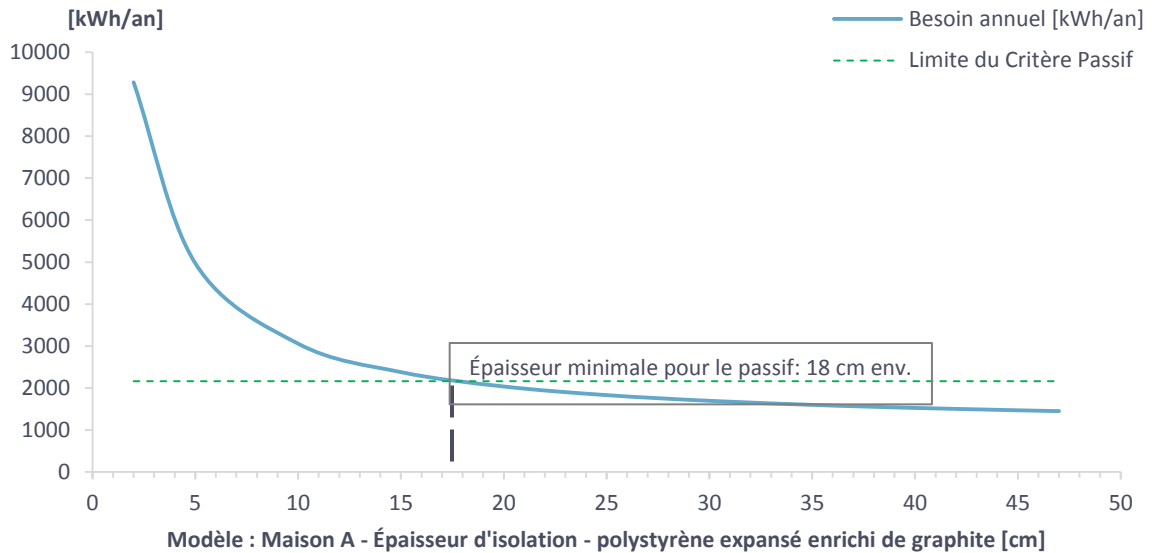


Figure 18. Évolution du besoin annuel pour le chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation dans les murs extérieurs-Modèle A

Modèle B :

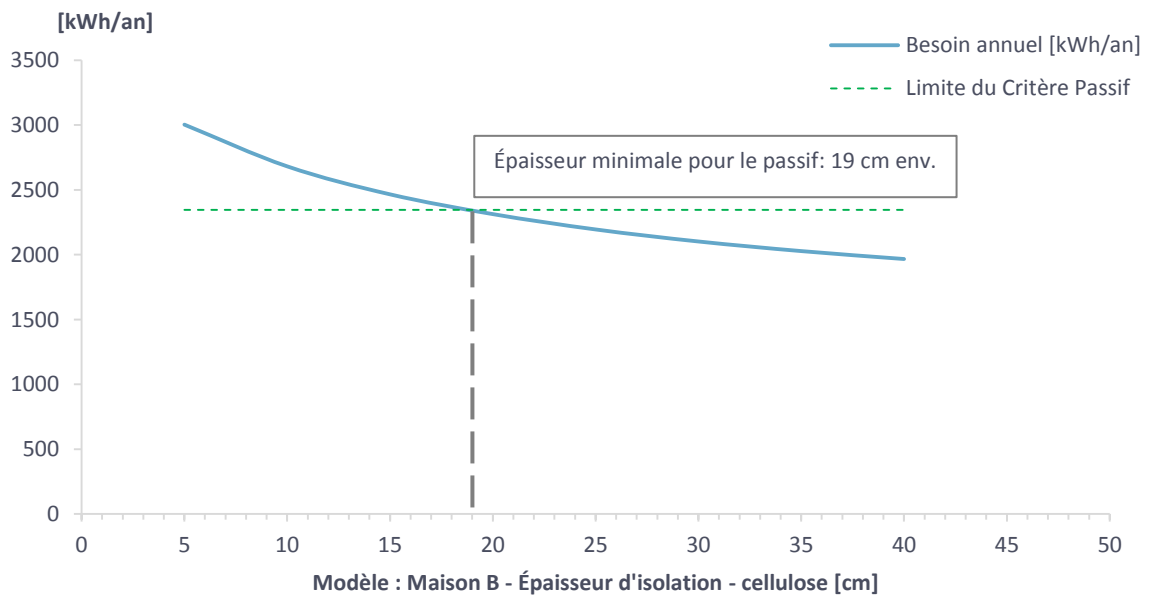


Figure 19. Évolution du besoin annuel pour le chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation dans les murs extérieurs-Modèle B

Modèle C :

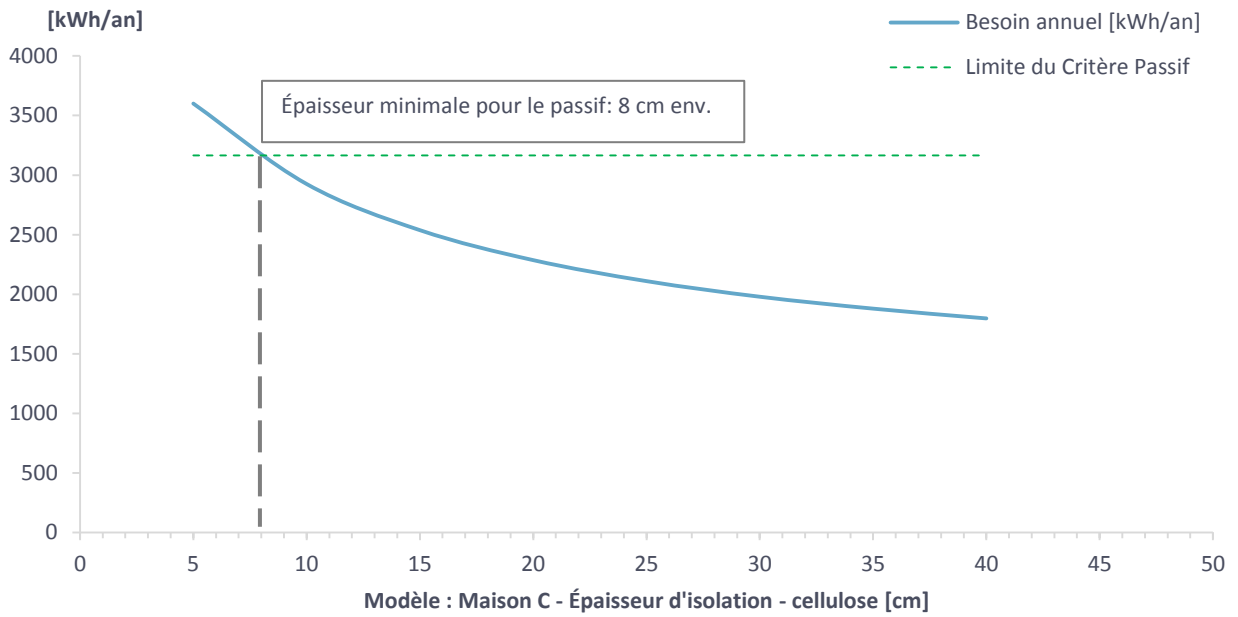


Figure 20. Évolution du besoin annuel pour le chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation dans les murs extérieurs - Modèle C

Modèle D :

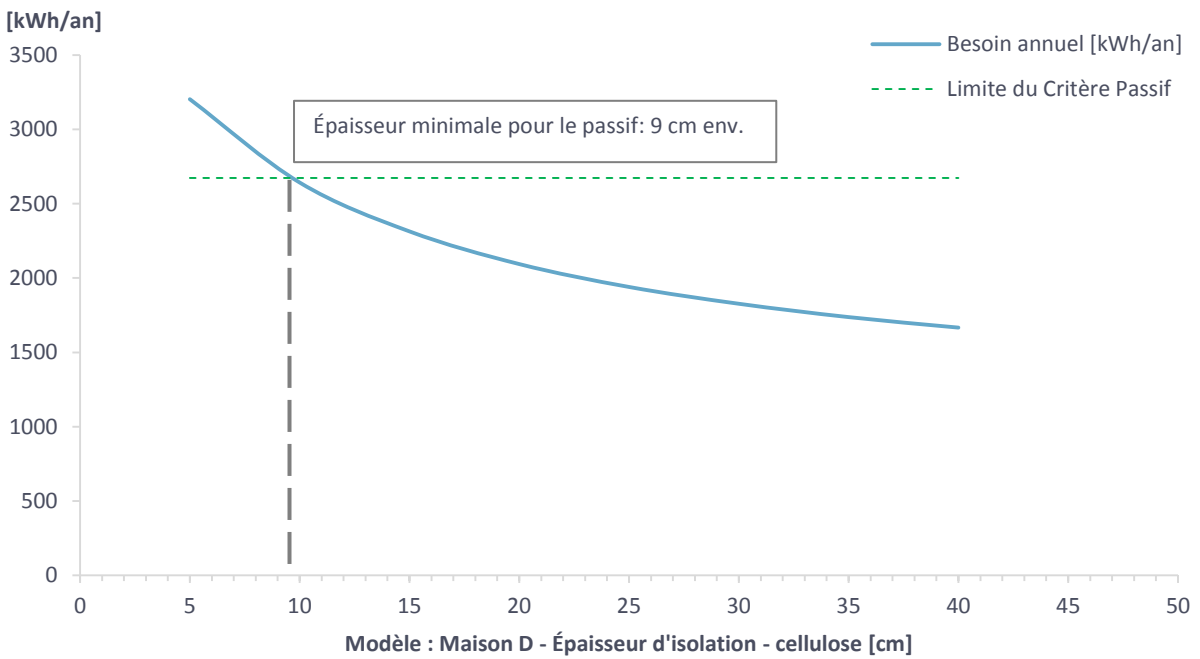


Figure 21. Évolution du besoin annuel pour le chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation dans les murs extérieurs - Modèle D

Pour chacun des modèles, l'épaisseur d'isolation dans les murs extérieurs a été modifiée par pas de 3, 5 et 2 cm. Les courbes montrent ainsi l'évolution du besoin résiduel du modèle pour le chauffage en fonction de la variation d'épaisseur de l'isolant. Cette simulation permet de mettre en lumière deux éléments.

En premier lieu, l'augmentation de l'épaisseur d'isolation connaît une limite. En effet, ceci est nettement visible dans la simulation avec le modèle A, à partir d'une certaine épaisseur, le gain apporté par l'ajout d'isolant devient minime jusqu'à devenir quasi nul. Pour le modèle en question, l'épaisseur limite, c'est-à-dire l'épaisseur à partir de laquelle le gain sur le besoin annuel pour le chauffage devient inférieur à 5 %, est de 37 cm. Au-delà de cette épaisseur d'isolant, le gain réalisé sur la consommation d'énergie pour le chauffage est négligeable (Tableau 40).

| Épaisseur de l'isolant [cm] | Besoin annuel résiduel pour le chauffage [kWh/an] | Gain apporté par l'ajout d'isolation [%] <i>exprimé par rapport au précédent</i> |
|-----------------------------|---|---|
| 2 | 9282 | - |
| 5 | 4971 | -46 % |
| 10 | 3058 | -38 % |
| 15 | 2380 | -22 % |
| 20 | 2037 | -14 % |
| 25 | 1832 | -10 % |
| 30 | 1696* | -7 % |
| 35 | 1599 | -6 % |
| 37 | 1568 | -2 % |
| 39 | 1540 | -2 % |
| 40 | 1527 | -1 % |

*modèle de référence : épaisseur d'isolation fixée à 30 cm, besoin annuel pour le chauffage 1696kWh/an.

Tableau 40. Evolution de la consommation pour le chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation - Modèle A

À ceci s'ajoute le surcoût lié à l'ajout d'isolant dans les murs. La courbe ci-dessous (Figure 22) représente le prix de l'isolant, le besoin annuel pour le chauffage et la limite du critère passif. Dans le cas d'une isolation en EPS dans le modèle A, une épaisseur de 30 cm représente un investissement supplémentaire. Cependant, celui-ci permet d'atteindre le critère passif pour le besoin net annuel pour le chauffage. L'ajout de cm supplémentaire engendre un surcoût pas forcément justifié compte tenu du gain négligeable sur la consommation de chauffage.

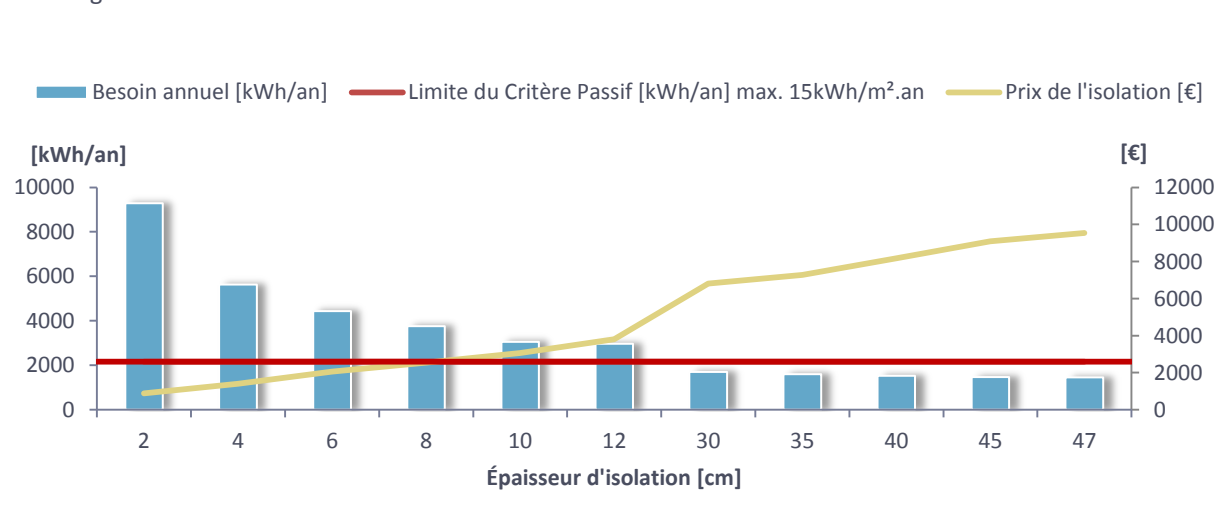


Figure 22. Evolution du prix de l'isolation en euros (polystyrène expansé) et du besoin annuel pour le chauffage en kWh/an en fonction de l'épaisseur de l'isolant en cm

Variation de l'orientation

Le but de cette simulation est d'évaluer l'impact de l'orientation de la maison sur sa performance globale (analyse du besoin net annuel pour le chauffage et de la surchauffe annuelle). La rotation est de 90° entre chaque simulation.

Le choix de l'orientation du bâtiment joue un rôle considérable, à la fois sur la consommation d'énergie pour le chauffage, mais également sur le confort thermique, notamment en été. Ceci est dû en grande partie à la proportion de surface vitrée des différentes façades. Cette simulation a été réalisée sans protection solaire dans les maisons.

Pour réaliser cette étude, les modèles ont été pivotés de 90° par rapport à leur situation initiale. La rotation peut être représentée comme suit (Figure 23) :

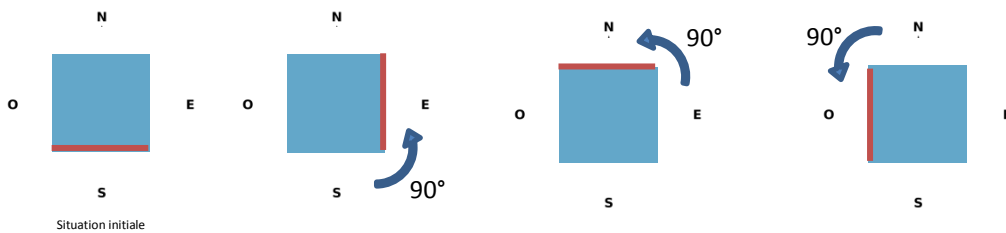


Figure 23. Rotation appliquée aux modèles 3D des maisons

La bordure rouge indique la façade d'entrée des maisons, avec à l'opposé l'accès au jardin, sauf dans le cas du modèle D, où l'entrée est orientée vers l'est et l'accès au jardin/terrasse orienté vers l'ouest.

Le besoin annuel d'énergie pour le chauffage est évalué pour chaque modèle selon son orientation et comparé à la situation initiale :

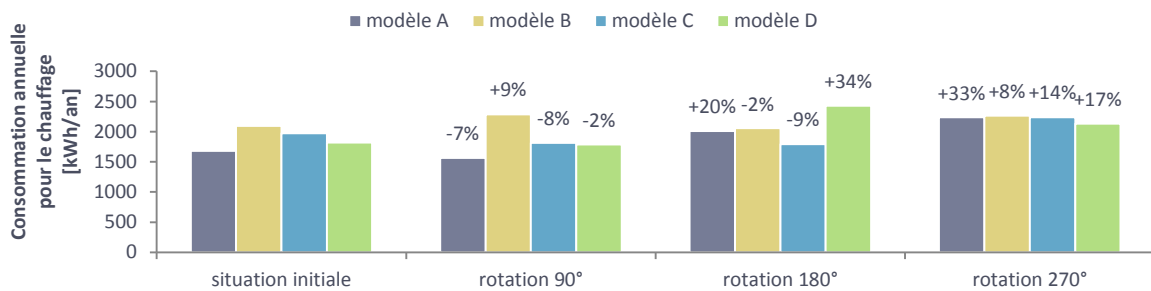


Figure 24. Résultats de simulation pour l'étude de l'impact de l'orientation sur le besoin annuel pour le chauffage

Les valeurs indiquées en pourcentage représentent la variation du besoin annuel (Figure 24), comparé à la situation initiale. Par exemple, pour la maison A une rotation de 90° dans le sens SUD -> EST, représente une réduction du besoin pour le chauffage de 7 %. À l'inverse, une rotation de 180° dans le sens SUD -> NORD, représente une augmentation de la consommation d'énergie pour le chauffage de 20 %.

La surchauffe annuelle est également évaluée (Figure 25):

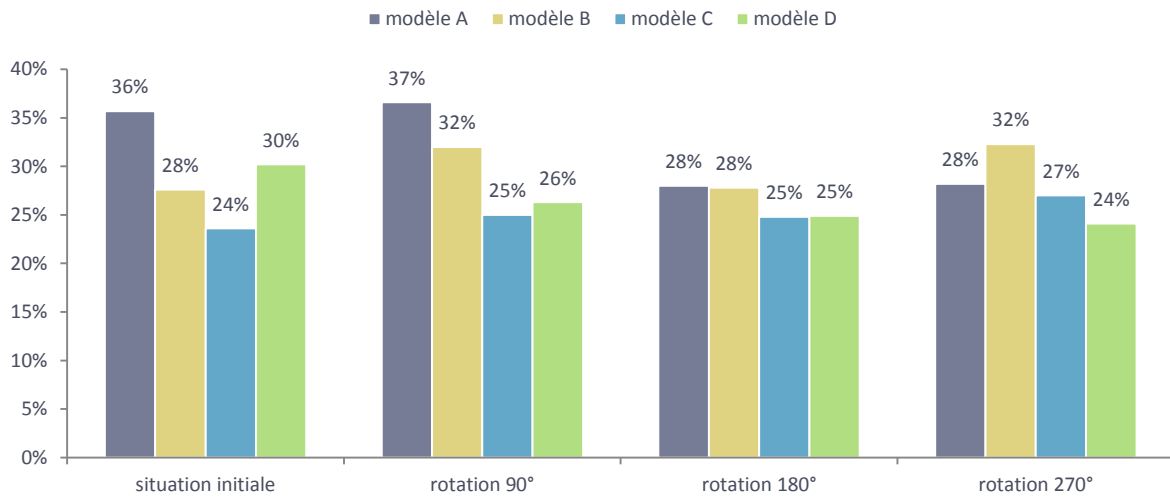


Figure 25. Résultats de simulation pour l'étude de l'impact de l'orientation sur la surchauffe annuelle

Au regard des résultats, l'impact de l'orientation sur la surchauffe annuelle ressentie dans les différents modèles de maisons est minime. Cela va surtout dépendre de l'orientation des parois présentant la plus grande proportion de vitrages.

Variation du facteur solaire g

Le facteur solaire g exprime la part de rayonnement entrant à travers une surface vitrée. Celui-ci est déterminé par le rapport entre l'énergie solaire totale passant à travers le vitrage et l'énergie solaire incidente sur ce vitrage. Ainsi, plus ce facteur est faible, plus les apports solaires sont moindres. Le facteur solaire est déterminé selon la norme NBN EN 410 [21].

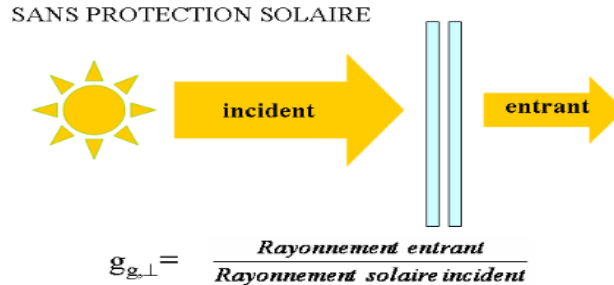


Figure 26. Définition du facteur solaire "g"[21]

Il s'agit ici de comparer deux facteurs solaires différents. Le premier a une valeur de 60 % et le second de 40 %.

Ces simulations ont mis en évidence l'importance de ce facteur, à la fois sur la consommation d'énergie pour le chauffage, mais également sur le risque de surchauffe dans les maisons. En effet, une valeur plus faible du facteur g est la conséquence d'une augmentation de la consommation d'énergie pour maintenir la température de consigne en hiver, mais d'une diminution du risque de surchauffe en été (Figures 27,28). À l'inverse, un facteur g plus grand va induire une diminution de la consommation pour le chauffage mais sera responsable d'une hausse de la surchauffe en été. Le facteur solaire de 0.4 a été utilisé pour les vitrages en toiture.

Figure 27. Impact du facteur solaire g sur le besoin annuel pour le chauffage

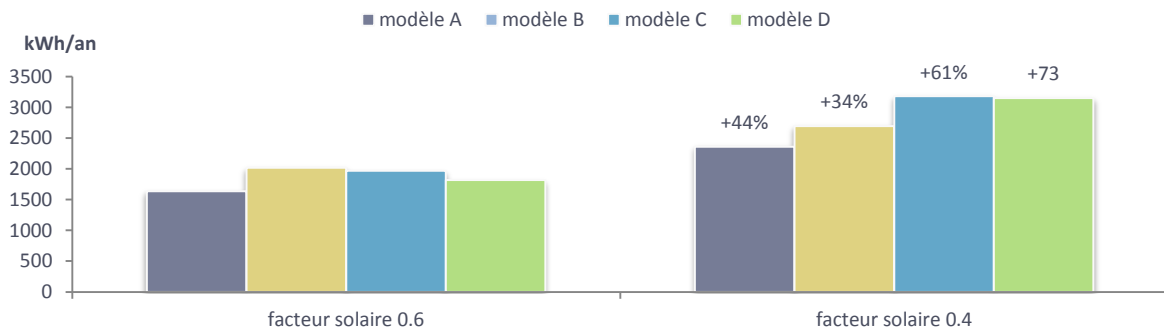
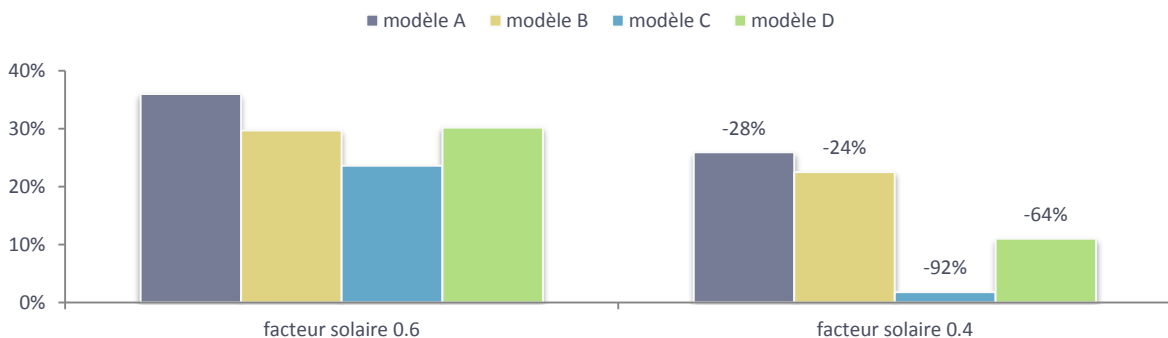


Figure 28. Impact du facteur solaire g sur la surchauffe annuelle



Impact des protections solaires et de la ventilation nocturne

L'influence des protections solaires dans les modèles, ainsi que de l'usage ou non d'une ventilation nocturne sur la surchauffe au sein des maisons a été également évaluée grâce au logiciel TRNSYS 17.

Pour étudier l'impact de ces protections solaires (PS), de la ventilation nocturne (VN) et de leur effet combiné (PS et VN), 6 scénarios différents ont été envisagés :

| Scenario | Description | abrégé |
|--------------|---|-------------------|
| Simulation 1 | Aucun moyen de lutte contre la surchauffe : <i>Aucune protection solaire ; aucune ventilation nocturne</i> | sans PS sans VN |
| Simulation 2 | Première action contre la surchauffe : <i>Protections solaires au Sud ; aucune ventilation nocturne</i> | PS SUD sans VN |
| Simulation 3 | Protections solaires complètes : <i>Toutes les surfaces vitrées exposées au soleil sont protégées, ceci comprend les façades Sud, Est et Ouest ; aucune ventilation nocturne</i> | PS totale sans VN |
| Simulation 4 | Ventilation nocturne uniquement ; aucune protection solaire | VN sans PS |
| Simulation 5 | Protections solaires au Sud avec Ventilation Nocturne | PS SUD avec VN |
| Simulation 6 | Action totale : <i>Toutes les surfaces vitrées exposées au soleil sont protégées, ceci comprend les façades Sud, Est et Ouest ; avec ventilation nocturne</i> | PS totale avec VN |

Tableau 41. Scénarios de simulation des protections solaires et ventilation nocturne

Impact des protections solaires sur la consommation annuelle pour le chauffage

| | Simulation 1 | Simulation 2 | Simulation 3 | Simulation 4 | Simulation 5 | Simulation 6 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Modèle A | 1682 | 1688 | 1694 | 1695 | 1696 | 1696 |
| Modèle B | 2097 | 2699 | 2700 | 2701 | 2102 | 2705 |
| Modèle C | 1970 | 1975 | 1976 | 1978 | 1979 | 1979 |
| Modèle D | 1817 | 1819 | 1826 | 1824 | 1827 | 1830 |

Tableau 42. Résultats de simulation - consommation pour le chauffage en fonction des scénarios de PS et VN

Le premier constat est que l'impact des protections solaires sur le besoin annuel de chauffage est minime. En effet, ces protections sont contrôlées pour être actives durant la période d'arrêt du système de chauffe (mi-mai à mi-septembre). La variation de la consommation annuelle pour le chauffage observée est faible (inférieure à 1 %). Cependant, bien que les protections solaires ne soient actives que lorsque le chauffage est à l'arrêt, cette légère variation peut être expliquée par la relance du système en hiver. En effet, il est possible que le dernier jour de la période de fonctionnement des PS soit une journée plus fraîche et par conséquent l'abaissement des stores entraîne à ce moment une perte d'apports solaires qui auraient pu être bénéfiques. Lors de la remise en marche du système, le chauffage doit donc compenser les apports solaires « perdus » à cause des protections solaires qui étaient abaissées.

Bien que l'impact des protections solaires soit relativement négligeable sur la consommation de chauffage, ce n'est pas le cas pour la surchauffe dans les maisons (Tableau 43).

| | Simulation 1 | Simulation 2 | Simulation 3 | Simulation 4 | Simulation 5 | Simulation 6 |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| modèle A | 36 % | 33 % | 3 % | 4 % | 3 % | 3 % |
| modèle B | 28 % | 3 % | 0 % | 1 % | 2 % | 0 % |
| modèle C | 24 % | 2 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % |
| modèle D | 30 % | 28 % | 2 % | 9 % | 3 % | 2 % |

Tableau 43. Résultats de simulation : Impact des protections solaires sur la surchauffe annuelle – présence des occupants prise en compte

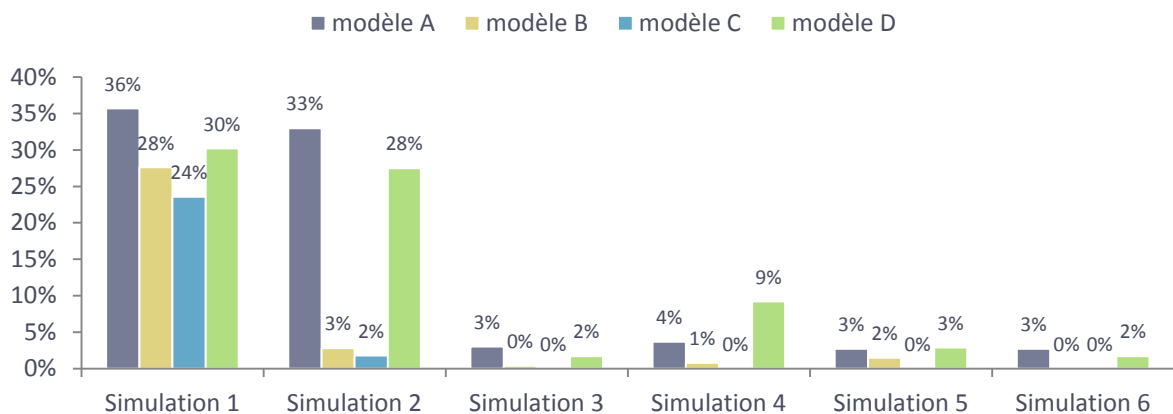


Figure 29. Evolution de la surchauffe annuelle dans les modèles en fonction des scénarios de PS et VN

La surchauffe est exprimée en pourcentage du temps sur une année où la température moyenne de la maison est supérieure à 25 °C. La limite du critère de surchauffe dans la maison passive est fixée à 5 % (cf. page 13). Dans le cas du modèle A de référence (avec protections solaires – PS ; et ventilation nocturne – VN), la maison respecte ce critère. Cependant, le retrait de ces protections et la suppression de la ventilation nocturne, induisent une hausse considérable de cette surchauffe qui atteint la valeur de 36 % (Figure 29).

La simulation 2, correspondant à l'ajout de protections solaires au niveau des baies vitrées orientées plein sud, donne des résultats différents entre les modèles. Ainsi pour A et D, l'ajout de PS au Sud a peu d'impact sur la surchauffe annuelle. Cependant, pour B et C cela représente un réel moyen de lutte contre cette surchauffe.

Pour les quatre dernières simulations, deux cas de figure se distinguent. Le premier consiste à utiliser un moyen mécanique automatisé : les protections solaires, et ceci de manière optimale au niveau des fenêtres les plus susceptibles d'induire un risque de surchauffe. Cette option représente un coût à prendre en compte. Ainsi, pour les simulations 3, 5 et 6, l'utilisation des protections solaires est un très bon moyen de lutte contre la surchauffe estivale, mais leur coût doit être pris en compte (Tableau 44).

| | A | B | C | D |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| SUD (€) | 1648 | 1642 | 1568 | 1418 |
| EST (€) | (mitoyen) | 180 | (mitoyen) | 1600 |
| OUEST (€) | 2898 | (mitoyen) | 1882 | 3460 |
| Total (€) | 4546 | 1822 | 3450 | 6478 |

Tableau 44. Estimation du coût des protections solaires pour chaque modèle de maison, coût unitaire de 200€/m² utilisé pour les calculs.

Le deuxième moyen de contrer le risque de surchauffe repose sur les gestes et habitudes des occupants. Dans le cas de la simulation 4, seule la ventilation nocturne est instaurée dans les modèles. Celle-ci semble également être très efficace comparée à la simulation 1 où les maisons sont dépourvues de moyen de lutte contre la surchauffe. Dans le cas d'une ventilation nocturne unique, aucun coût n'est à prévoir. Cependant, son efficacité va dépendre de quelques facteurs, tels que le comportement des occupants ou encore la possibilité d'ouvrir les fenêtres (il est plus difficile de laisser des fenêtres ouvertes au rez-de-chaussée pour des raisons de sécurité face aux risques d'intrusion par exemple).

En conclusion, un compromis a été réalisé en limitant le recours à des protections solaires (vitrages les plus exposés et utilisation en priorité dans les zones d'intimité telles que la salle de bain ou les chambres) et en combinant cette utilisation avec celle d'une ventilation nocturne.

Etude des systèmes : solaire photovoltaïque

Pour atteindre un bilan annuel positif en énergie primaire, les 4 projets de maisons E+ sont équipés de panneaux solaires photovoltaïques. Le choix des panneaux est déterminant puisqu'il conditionne la plus grande partie de la production d'énergie renouvelable. Cette production doit être suffisante pour compenser au minimum la demande énergétique de la maison, et dans une certaine mesure de la dépasser.

Quatre types de panneaux ont été testés pour obtenir l'estimation des productions annuelles d'électricité de chacun des 4 modèles de maisons (Tableau 45):

| Panneau | Puissance maximum (W) | Nombres de cellules en série | Surface du module (m ²) |
|-----------|--------------------------|---------------------------------|--|
| Panneau 1 | 123 | 36 | 0.99 |
| Panneau 2 | 185 | 72 | 1.30 |
| Panneau 3 | 240 | 72 | 1.26 |
| Panneau 4 | 335 | 96 | 1.63 |

Panneau 1 < Panneau 2 < Panneau 3 < Panneau 4

Tableau 45. Caractéristiques techniques des quatre types de panneaux solaires photovoltaïques comparés par simulation dynamique

Pour réaliser les simulations liées à la production annuelle d'électricité des différents panneaux étudiés, deux cas de figure ont été envisagés. Le premier consiste à ne pas prendre en compte la surface requise pour l'installation de capteurs solaires thermiques ; à l'inverse, le second cas prend en compte cette surface. Par conséquent, le nombre de modules photovoltaïques varie d'un cas à l'autre. Le calcul du nombre possible de panneaux à poser sur le toit tient compte de la géométrie des modules et de la toiture (surface disponible en tenant compte d'éventuelles fenêtres de toiture). Les surfaces de toit étant différentes entre les maisons du projet, voici le tableau donnant les informations sur les puissances photovoltaïques installées suivant les 2 cas de figure mentionnés précédemment :

| | | PANNEAU 1 | | | | | |
|---|------------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| CAS : SANS SOLAIRE THERMIQUE | | Unité | Maison A | Maison B | Maison C | Maison D | Maison D |
| | Surface de toit disponible | m ² | 31 | 34 | 51 | 42 | 42 |
| | Orientation du toit (azimut) | degré | -11° | -11° | 20° | 262° | 82° |
| | | | SUD | SUD | SUD | EST | OUEST |
| | Inclinaison du toit (pente) | degré | 35° | 35° | 28° | 30° | 30° |
| | Nombre de modules max. | - | 31 | 34 | 52 | 42 | 42 |
| | Surface du champ | m ² | 30.76 | 33.74 | 51.60 | 41.68 | 41.68 |
| | Puissance crête équivalente | kWc | 3.8 | 4.2 | 6.4 | 5.2 | 5.2 |
| Production annuelle estimée | kWh/an | 3174 | 3482 | 5283 | 3536 | 3736 | |
| CAS : AVEC SOLAIRE THERMIQUE (surface : 6.96 m ²) | | Unité | Maison A | Maison B | Maison C | Maison D | Maison D |
| | Surface de toit disponible | m ² | 31 | 34 | 51 | 42 | 42 |
| | Orientation du toit | degré | -11° | -11° | 20° | 262° | 82° |
| | | | SUD | SUD | SUD | EST | OUEST |
| | Inclinaison du toit | degré | 35° | 35° | 28° | 30° | 30° |
| | Nombre de modules max. | - | 24 | 27 | 44 | 35 | 35 |
| | Surface du champ | m ² | 23.82 | 26.79 | 43.66 | 34.73 | 34.73 |
| | Puissance crête équivalente | kWc | 2.9 | 3.3 | 5.4 | 4.3 | 4.3 |
| Production annuelle estimée | kWh/an | 2458 | 2765 | 4470 | 2947 | 3113 | |

Tableau 46. Résultats de simulation : Panneau 1

| PANNEAU 2 | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| CAS : SANS SOLAIRE THERMIQUE | Surface de toit disponible | Unité <i>m²</i> | Maison A 31 | Maison B 34 | Maison C 51 | Maison D 42 | Maison D 42 |
| | Orientation du toit | <i>degré</i> | -11° SUD | -11° SUD | 20° SUD | 262° EST | 82° OUEST |
| | Inclinaison du toit | <i>degré</i> | 35° | 35° | 28° | 30° | 30° |
| | Nombre de modules max. | - | 20 | 21 | 33 | 27 | 27 |
| | Surface du champ | <i>m²</i> | 30.98 | 32.52 | 51.11 | 41.82 | 41.82 |
| | Puissance crête équivalente | <i>kWc</i> | 3.7 | 3.9 | 6.1 | 5.0 | 5.0 |
| | Production annuelle estimée | <i>kWh/an</i> | 2978 | 3127 | 4881 | 3283 | 3488 |
| | Surface de toit disponible | Unité <i>m²</i> | Maison A 31 | Maison B 34 | Maison C 51 | Maison D 42 | Maison D 42 |
| | Orientation du toit | <i>degré</i> | -11° SUD | -11° SUD | 20° SUD | 262° EST | 82° OUEST |
| | Inclinaison du toit | <i>degré</i> | 35° | 35° | 28° | 30° | 30° |
| Nombre de modules max. | - | 15 | 17 | 28 | 22 | 22 | |
| Surface du champ | <i>m²</i> | 23.23 | 26.33 | 43.37 | 34.07 | 34.07 | |
| Puissance crête équivalente | <i>kWc</i> | 2775 | 3.1 | 5.2 | 4.1 | 4.1 | |
| Production annuelle estimée | <i>kWh/an</i> | 2234 | 2531 | 4141 | 2675 | 2842 | |

Tableau 47. Résultats de simulation : Panneau 2

| PANNEAU 3 | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| CAS : SANS SOLAIRE THERMIQUE | Surface de toit disponible | Unité <i>m²</i> | Maison A 31 | Maison B 34 | Maison C 51 | Maison D 42 | Maison D 42 |
| | Orientation du toit | <i>degré</i> | -11° SUD | -11° SUD | 20° SUD | 262° EST | 82° OUEST |
| | Inclinaison du toit | <i>degré</i> | 35° | 35° | 28° | 30° | 30° |
| | Nombre de modules max. | - | 24 | 26 | 40 | 33 | 33 |
| | Surface du champ | <i>m²</i> | 30.26 | 32.78 | 50.43 | 41.61 | 41.61 |
| | Puissance crête équivalente | <i>kWc</i> | 5.8 | 6.2 | 9.6 | 7.9 | 7.9 |
| | Production annuelle estimée | <i>kWh/an</i> | 4750 | 5145 | 7848 | 5405 | 5673 |
| | Surface de toit disponible | Unité <i>m²</i> | Maison A 31 | Maison B 34 | Maison C 51 | Maison D 42 | Maison D 42 |
| | Orientation du toit | <i>degré</i> | -11° SUD | -11° SUD | 20° SUD | 262° EST | 82° OUEST |
| | Inclinaison du toit | <i>degré</i> | 35° | 35° | 28° | 30° | 30° |
| Nombre de modules max. | - | 19 | 21 | 35 | 28 | 28 | |
| Surface du champ | <i>m²</i> | 25.22 | 26.48 | 44.13 | 35.30 | 35.30 | |
| Puissance crête équivalente | <i>kWc</i> | 4.8 | 5.0 | 8.4 | 6.7 | 6.7 | |
| Production annuelle estimée | <i>kWh/an</i> | 3958 | 4156 | 6867 | 4586 | 4813 | |

Tableau 48. Résultats de simulation : Panneau 3

| PANNEAU 4 | | | | | | | |
|--|-----------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CAS : SANS SOLAIRE THERMIQUE | Surface de toit disponible | Unité | Maison A | Maison B | Maison C | Maison D | Maison D |
| | Orientation du toit | <i>degré</i> | -11° | -11° | 20° | 262° | 82° |
| | Inclinaison du toit | <i>degré</i> | 35° | 35° | 28° | 30° | 30° |
| | Nombre de modules max. | - | 19 | 20 | 31 | 25 | 25 |
| | Surface du champ | <i>m²</i> | 30.98 | 32.61 | 50.55 | 40.77 | 40.77 |
| | Puissance crête équivalente | <i>kWc</i> | 6.4 | 6.7 | 10.3 | 8.4 | 8.4 |
| | Production annuelle estimée | <i>kWh/an</i> | 4948 | 5208 | 7992 | 5328 | 5605 |
| | | | | | | | |
| CAS : AVEC SOLAIRE THERMIQUE (surface : 6.96 m²) | Surface de toit disponible | Unité | Maison A | Maison B | Maison C | Maison D | Maison D |
| | Orientation du toit | <i>degré</i> | -11° | -11° | 20° | 262° | 82° |
| | Inclinaison du toit | <i>degré</i> | 35° | 35° | 28° | 30° | 30° |
| | Nombre de modules max. | - | 14 | 16 | 27 | 21 | 21 |
| | Surface du champ | <i>m²</i> | 22.83 | 26.09 | 44.03 | 34.24 | 34.24 |
| | Puissance crête équivalente | <i>kWc</i> | 4.7 | 5.3 | 9.0 | 7.0 | 7.0 |
| | Production annuelle estimée | <i>kWh/an</i> | 3646 | 4166 | 6961 | 4475 | 4708 |
| | | | | | | | |

Tableau 49. Résultats de simulation : Panneau 4

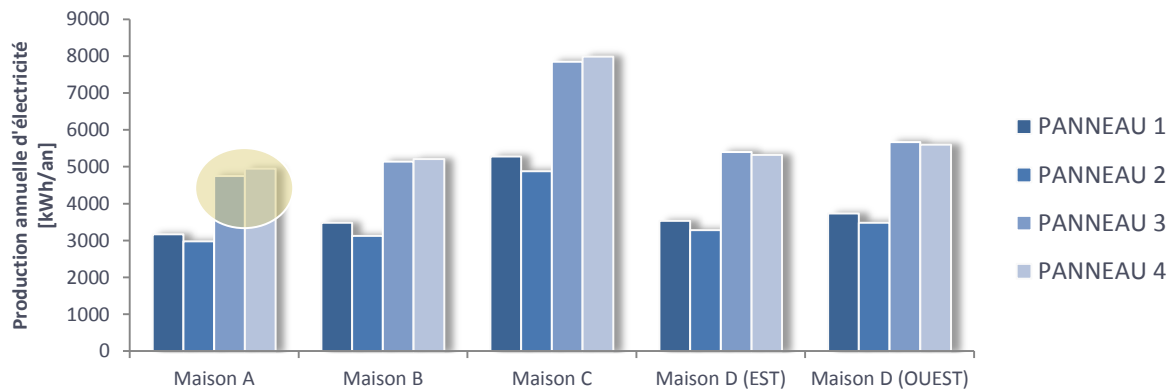


Figure 30. Cas 1 : Estimation de la production annuelle photovoltaïque – sans solaire thermique

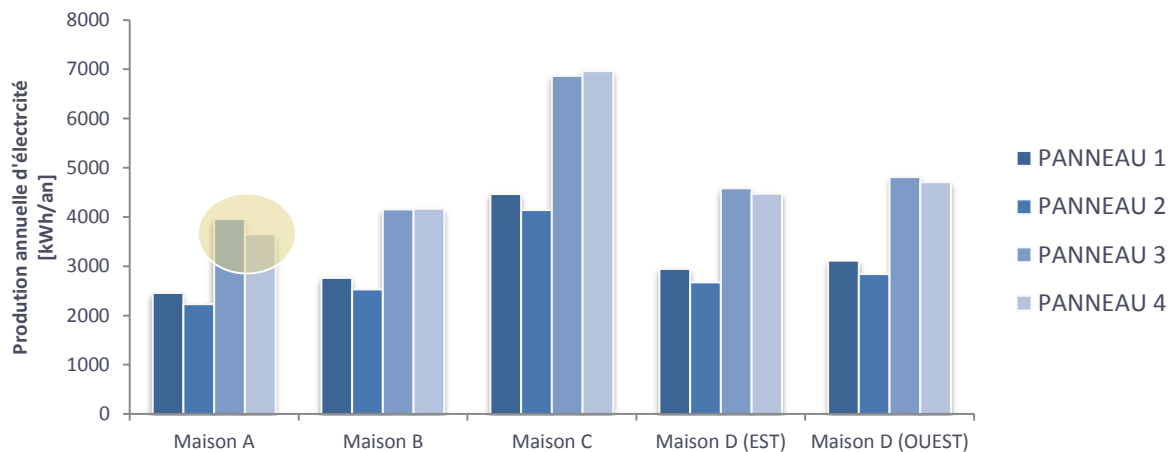


Figure 31. Cas 2 : Estimation de la production annuelle photovoltaïque – avec solaire thermique

La production annuelle d'électricité varie d'un type de panneau à l'autre compte tenu des performances différentes de chacun d'entre eux. Quel que soit le cas de figure, avec ou sans solaire thermique, les panneaux

3 et 4 offrent tous deux une meilleure production annuelle d'électricité par rapport aux deux autres types de panneaux (Figures 30,31). Cependant il existe une variation entre les maisons pour l'un ou l'autre des panneaux (3 et 4). Ceci est principalement dû aux configurations des quatre toitures qui sont selon le cas de figure, deviennent plus favorables ou non à l'un ou l'autre de ces deux panneaux (par exemple pour le modèle A, le panneau 3 est plus intéressant lorsque du solaire thermique est installé). Pour réaliser le bilan énergétique annuel dans les scénarios d'optimisation, le panneau choisi est bien entendu celui offrant la plus grande production annuelle d'électricité.

Etude des systèmes : Eau chaude sanitaire (ECS)

Variantes de simulations

Quatre systèmes de productions d’eau chaude sanitaire ont été comparés (Tableau 50):

| Scenario | ECS 1 | ECS 2 | ECS 3 | ECS 4 |
|--------------------------------------|------------------------|---|--|--|
| Description | Chauffe-eau électrique | Chauffe-eau solaire avec appoint électrique | Chauffe-eau solaire avec appoint pompe à chaleur | Chauffe-eau avec pompe à chaleur et appoint électrique |
| Capacité du ballon (L) | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Puissance nominale de l’appoint (kW) | 2 | 2 | - | 2 |
| Température de consigne du ballon | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Température de puisage (°C) | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Efficacité de l’échangeur | - | 80 % | 80 % | 80 % |
| Surface de capteur (m ²) | - | 6.96 | 6.96 | - |
| Pompe à chaleur | - | - | air/eau (6 kW) | air/eau (6 kW) |

Tableau 50. Description des quatre systèmes ECS comparés par simulation dynamique

Comparaison des systèmes ECS

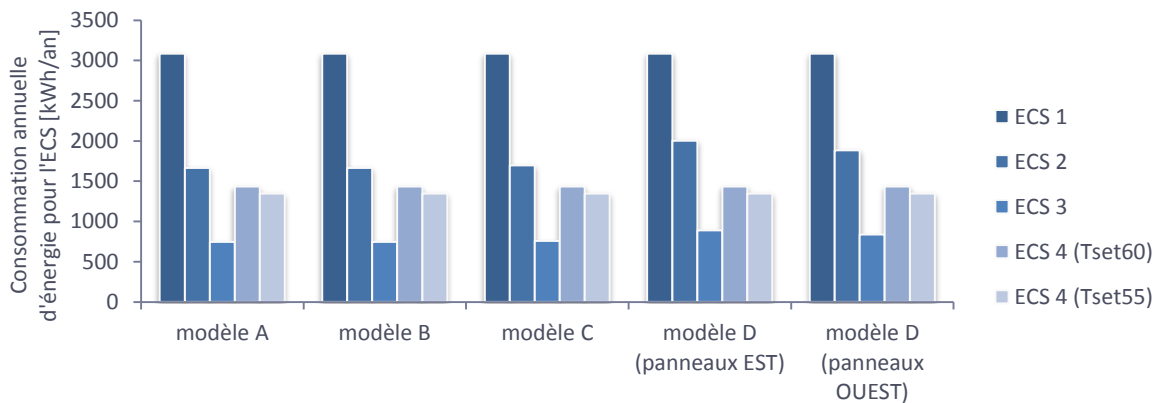
Les résultats présentés dans ce paragraphe sont donnés pour le système de production d’ECS seul. Le but est de comparer quatre systèmes différents : ECS 1, ECS 2, ECS 3 et ECS 4, indépendamment du système de chauffage. Les valeurs obtenues expriment l’énergie requise par les systèmes (en kWh/an), pour produire de l’eau chaude (Tableau 51, Figure 32). Le profil de charge utilisé est celui de la Task 32 de l’IEA [22].

Tableau 51. Consommation annuelle estimée (kWh/an) pour la production d’eau chaude sanitaire

| | Modèle A | Modèle B | Modèle C | Modèle D (EST) | Modèle D (OUEST) |
|--------------|----------|----------|----------|----------------|------------------|
| ECS 1 | 3084 | 3084 | 3084 | 3084 | 3084 |
| ECS 2 | 1666 | 1666 | 1967 | 2003 | 1884 |
| ECS 3 | 745 | 745 | 758 | 891 | 837 |
| ECS 4 | 1433 | 1433 | 1433 | 1433 | 1433 |
| (Tset 60 °C) | | | | | |
| ECS 4 | 1347 | 1347 | 1347 | 1347 | 1347 |
| (Tset 55 °C) | | | | | |

Remarque : pour les systèmes ayant recours à des pompes de circulation (ECS 2 et ECS 3), la consommation liée aux auxiliaires a été intégrée au résultat final de consommation d’énergie pour l’ECS.

Figure 32. Consommation annuelle estimée (kWh/an) pour la production d’eau chaude sanitaire



Le système ECS 1 est un préparateur d'eau chaude avec une résistance électrique de 2 kW. Dans ce cas, l'énergie annuelle requise par le système s'élève à plus de 3000 kWh/an pour chaque maison. Ce même système est complété d'une boucle solaire constituée de :

- trois panneaux solaires thermiques (pour une surface de champ solaire estimée à 6.96 m² selon la géométrie des panneaux choisis pour la simulation),
- un échangeur (efficacité fixée à 80 %),
- deux pompes pour permettre la circulation des fluides.

Ce nouveau système, ECS 2, permet de réduire de 35 à 45 % la consommation électrique annuelle pour la production d'ECS. Dans ce cas, les panneaux solaires servent à produire l'eau chaude et l'appoint se met en route seulement si les panneaux ne sont pas suffisants pour que l'eau atteigne la température de consigne (ici fixée à 60 °C).

Le principe du système ECS 3 est le même que celui d'ECS 2, à la différence que l'appoint est cette fois réalisé par une pompe à chaleur de type air/eau. La puissance de la PAC est de 6 kW (dimensionnée pour pouvoir couvrir les besoins en chauffage et en ECS). Grâce au COP de la PAC, la consommation électrique du système est largement inférieure aux deux systèmes précédents. Dans ce cas, cette consommation est réduite de quasiment un tiers dans les 4 modèles.

Enfin, le dernier système ECS 4, est le même système qu'ECS 3 mais la boucle solaire a été supprimée. Ainsi, la PAC seule fournit l'énergie pour produire l'eau chaude dans les modèles. Ces résultats mettent en évidence l'apport fourni par les panneaux solaires thermiques. La température de consigne de la PAC a également été réduite de 5 °C (Tset55), pour des raisons de contraintes techniques liées à la PAC choisie, ce qui induit une diminution de la consommation annuelle d'énergie pour produire l'eau chaude.

Etude des systèmes : Production de chauffage

Variantes de simulations : choix des scénarios

À partir des différents types de systèmes ECS et de production de chauffage, différents scénarios combinant ces systèmes ont été envisagés pour les simulations (Figure 33). Le but étant d'une part de comparer ces scénarios entre eux, mais également de déterminer le système énergétique valable dans les 4 modèles de maisons et leur permettant de répondre aux critères de maisons à énergie positive.



Figure 33. Variantes de simulation : combinaisons des systèmes

Le tableau suivant présente les différentes variantes de simulation (Tableau 52) :

| Variante | Chauffage | ECS | EnR |
|------------------------|----------------------------|---|-------------------------------------|
| Variante 1 - V1 | | | |
| V1a | Électrique | Ballon électrique (ECS 1) | Solaire photovoltaïque |
| V1b | Électrique | Ballon solaire (ECS 2) | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V1c | Électrique | Ballon solaire et appoint par PAC (ECS 3) | Solaire thermique et photovoltaïque |
| Variante 2 - V2 | | | |
| V2a | Poêle à pellets | Ballon électrique (ECS 1) | Solaire photovoltaïque |
| V2b | Poêle à pellets | Ballon solaire (ECS 2) | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V2c | Poêle à pellets | Ballon solaire et appoint par PAC (ECS 3) | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V2d | Poêle à pellets + appoints | Ballon solaire et appoint par PAC (ECS 3) | Solaire thermique et photovoltaïque |
| Variante 3 - V3 | | | |
| V3 | Air chaud pulsé | - | - |
| Variante 4 - V4 | | | |
| V4a | PAC et radiateurs | Ballon solaire et appoint par PAC (ECS 3) | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V4b | PAC et radiateurs | Ballon solaire et appoint par PAC (ECS 4) | Solaire photovoltaïque |

Tableau 52. Variantes de simulation - Systèmes

À partir des résultats de simulations, plusieurs critères seront pris en compte pour déterminer le système qui permet de répondre aux caractéristiques de la maison E+ telle que décrite dans le CDC du projet. Ces critères sont d'ordres :

- énergétique : analyse de la consommation et production d'énergie primaire : bilan annuel en énergie primaire (facteurs de conversion en énergie primaire de la RW [7]),
- économique : analyse du coût du système (estimations), ainsi que du coût annuel de l'énergie consommée et calcul du temps de retour par rapport à un système de référence (chauffage au gaz),
- environnemental : évaluation des émissions de CO₂ en kg de CO₂/an (facteur d'émissions en RW [20]),
- thermique : respect du critère de surchauffe de la maison passive. Évaluation de la sous-chauffe en hiver.

Chauffage électrique

Description du système

Il s'agit d'un système local de production et émission de chaleur. Pour représenter ce système, des radiateurs électriques ont été simulés par le biais du logiciel TRNBuild (Figure 34). Ces radiateurs sont intégrés dans les pièces considérées comme des « pièces de vie » au sein des différents modèles de maisons. Le rendement de production des radiateurs à résistance électrique est considéré comme étant égal à 100 % [23]. La consigne de température est celle prévue dans les hypothèses initiales de travail (cf. page 12).

Encodage du système de chauffage électrique dans l'interface « Heating Type Manager » du logiciel TRNBuild.

Puissance du système illimitée : hypothèse d'un système à rendement de production de 100 % capable de compenser instantanément les pertes du bâtiment sans perte thermique.

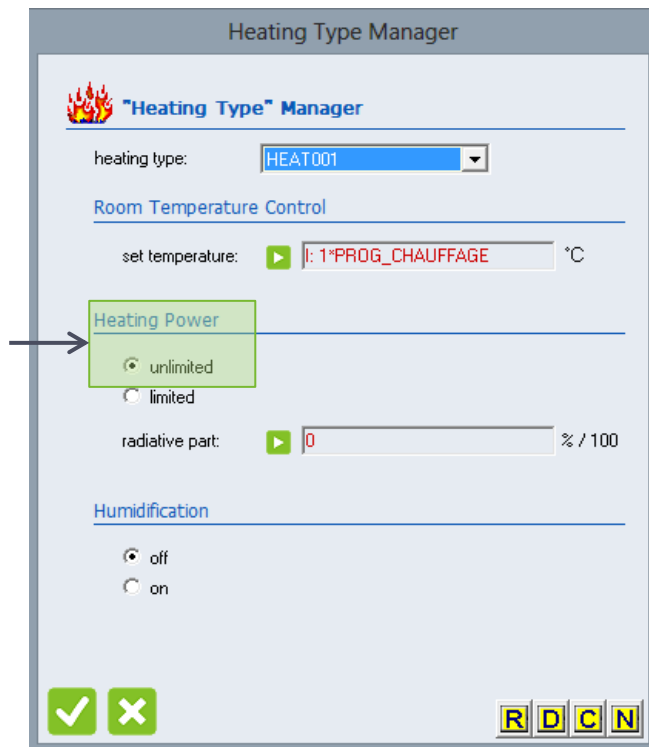


Figure 34. Encodage dans TRNBuild du système de chauffage de type électrique

Le système de chauffage électrique a été combiné avec trois systèmes différents de production d'ECS et d'EnR. Il en résulte 3 variantes (Tableau 53):

| Variante | Chauffage | ECS | EnR |
|-----------------|------------|---|-------------------------------------|
| Variante 1 - V1 | | | |
| V1a | Électrique | Ballon électrique (ECS 1) | Solaire photovoltaïque |
| V1b | Électrique | Ballon solaire (ECS 2) | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V1c | Électrique | Ballon solaire et appoint par PAC (ECS 3) | Solaire thermique et photovoltaïque |

Tableau 53. Variantes : Chauffage électrique

Résultats de simulation – V1a

Chauffage électrique | Ballon électrique | Solaire photovoltaïque

| Critère énergétique | | | | |
|---|--------------|--------------|-------------|--------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - chauffage électrique [kWh/an] | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Surface de plancher chauffé (Ach) [m²] | 144.24 | 156.38 | 211 | 178.19 |
| Besoin annuel pour le chauffage [kWh/m².an] - critère pmp max. 15 kWh/m².an | -12 | -13 | -9 | -10 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 3085 | 3085 | 3085 | 3085 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Total des consommations [kWh/an] | 6653 | 7109 | 7011 | 6790 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 4948 | 5208 | 7992 | 5673 |
| Bilan annuel [kWh/an] | -4263 | -4753 | 2453 | -2793 |
| Résultat performance énergétique - critère maison E+ VallEnergie | | | | |

| Critères environnemental et économique | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - chauffage électrique [kWh/an] | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Vecteur énergétique pour le chauffage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Consommation annuelle d'EP | 4240 | 5255 | 4995 | 4563 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 852 | 1056 | 1003 | 917 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour le chauffage (€/an) | 349 | 433 | 412 | 376 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 3085 | 3085 | 3085 | 3085 |
| Vecteur énergétique pour l'ECS | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 3085 | 3085 | 3085 | 3085 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 3085 | 3085 | 3085 | 3085 |
| Consommation annuelle d'EP | 7712.5 | 7712.5 | 7712.5 | 7712.5 |

| | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 1549 | 1549 | 1549 | 1549 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'ECS (€/an) | 636 | 636 | 636 | 636 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Vecteur énergétique pour la ventilation | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 1279 | 1279 | 1279 | 1279 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 3762 | 3762 | 3762 | 3762 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 756 | 756 | 756 | 756 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour la ventilation [€/an] | 310 | 310 | 310 | 310 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Vecteur énergétique pour l'éclairage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 918 | 1043 | 1058 | 938 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire][20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 184 | 209 | 212 | 188 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'éclairage [€/an] | 76 | 86 | 87 | 77 |

| Bilan | | | | |
|--|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Total des consommations [kWh/an] | 6653 | 7109 | 7011 | 6790 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 4948 | 5208 | 7992 | 5673 |
| Bilan annuel [kWh/an] | -4262 | -4752 | 2453 | -2792 |
| Émissions CO ₂ évitées [kg/an] | 1952 | 2055 | 3153 | 2238 |
| Émissions CO₂ globales [kg/an] | 856 | 955 | -493 | 561 |
| Coût annuel de l'énergie [€/an]* | 878 | 979 | -505 | 575 |

**Le coût annuel est calculé d'après le prix d'achat moyen de l'électricité [24]. Ce coût est donc donné à titre informatif et ne reflète pas le coût réel en cas de revente du surplus de production électrique par les panneaux solaires photovoltaïques.*

Bilan annuel en énergie primaire (Figure 35) :

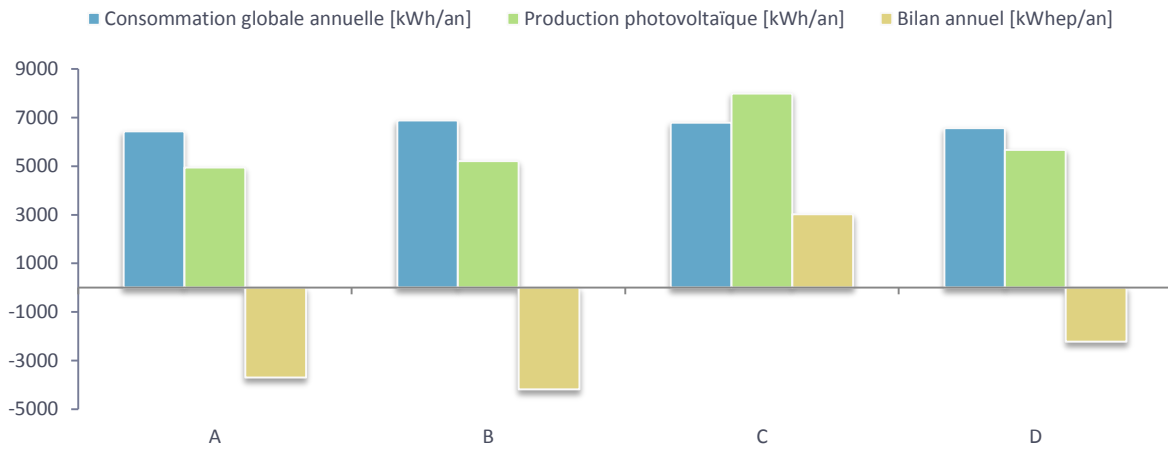


Figure 35. Bilan annuel en énergie primaire - V1a

Le modèle C présente un bilan annuel en énergie primaire (EP) positif. La production annuelle locale d'EnR est supérieure à la consommation annuelle du modèle. Les bilans des trois autres modèles sont négatifs, la production est insuffisante pour compenser intégralement la consommation énergétique des maisons (A, B, et D). Cependant, d'après les exigences de la maison passive le critère pour le besoin en énergie pour le chauffage est inférieur à la limite de 15 kWh/m².an [10] pour les quatre modèles. Les maisons respectent donc le critère passif pour le chauffage. Le critère pour la surchauffe est également respecté, chaque modèle présente un pourcentage de surchauffe annuelle inférieur à 5 %. D'après les critères de l'ASBL Plateforme Maison Passive, les quatre modèles sont passifs pour cette variante de simulation. Après étude des températures intérieures il a été conclu que ce système permettait d'assurer un confort thermique suffisant en hiver.

Résultats de simulation – V1b

Chauffage électrique | Ballon solaire | Solaire photovoltaïque et thermique

| Critère énergétique | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - chauffage électrique [kWh/an] | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Surface de plancher chauffé (Ach) [m²] | 144.24 | 156.38 | 211 | 178.19 |
| Besoin annuel pour le chauffage [kWh/m².an] - critère pmp max. 15 kWh/m².an | -12 | -13 | -9 | -10 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 1666 | 1666 | 1698 | 2002 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Total des consommations [kWh/an] | 5234 | 5690 | 5624 | 5707 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4166 | 6961 | 4813 |
| Gain utile solaire thermique [kWh/an] | 1859 | 1859 | 1826 | 1440 |
| Bilan annuel [kWh/an] | -3190 | -3810 | 3343 | -2235 |
| Résultat performance énergétique - critère maison E+ VallEnergie | | | | |

| Critères environnemental et économique | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - chauffage électrique [kWh/an] | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Vecteur énergétique pour le chauffage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Consommation annuelle d'EP | 4240 | 5255 | 4995 | 4563 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 852 | 1056 | 1003 | 917 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour le chauffage (€/an) | 349 | 433 | 412 | 376 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 1666 | 1666 | 1698 | 2002 |
| Vecteur énergétique pour l'ECS | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 1666 | 1666 | 1698 | 2002 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 1666 | 1666 | 1698 | 2002 |
| Consommation annuelle d'EP | 4165 | 4165 | 4245 | 5005 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg /an) | 837 | 837 | 853 | 1006 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'ECS (€/an) | 343 | 343 | 350 | 412 |

| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Vecteur énergétique pour la ventilation | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 1279 | 1279 | 1279 | 1279 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 3762 | 3762 | 3762 | 3762 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire][20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg /an] | 756 | 756 | 756 | 756 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour la ventilation [€/an] | 310 | 310 | 310 | 310 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Vecteur énergétique pour l'éclairage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 918 | 1043 | 1058 | 938 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire][20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg /an] | 184 | 209 | 212 | 188 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'éclairage [€/an] | 76 | 86 | 87 | 77 |

| Bilan | | | | |
|--|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Total des consommations [kWh/an] | 5234 | 5690 | 5624 | 5707 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4166 | 6961 | 4813 |
| Bilan annuel [kWh/an] | -3189 | -3809 | 3343 | -2234 |
| Émissions CO ₂ évitées [kg/an] | 1561 | 1644 | 2746 | 1899 |
| Émissions CO ₂ globales [kg/an] | 641 | 765 | -672 | 449 |
| Coût annuel de l'énergie [€/an]* | 657 | 785 | -689 | 460 |

**Le coût annuel est calculé d'après le prix d'achat moyen de l'électricité [24]. Ce coût est donc donné à titre informatif et ne reflète pas le coût réel en cas de revente du surplus de production électrique par les panneaux solaires photovoltaïques.*

Bilan annuel en énergie primaire (Figure 36) :

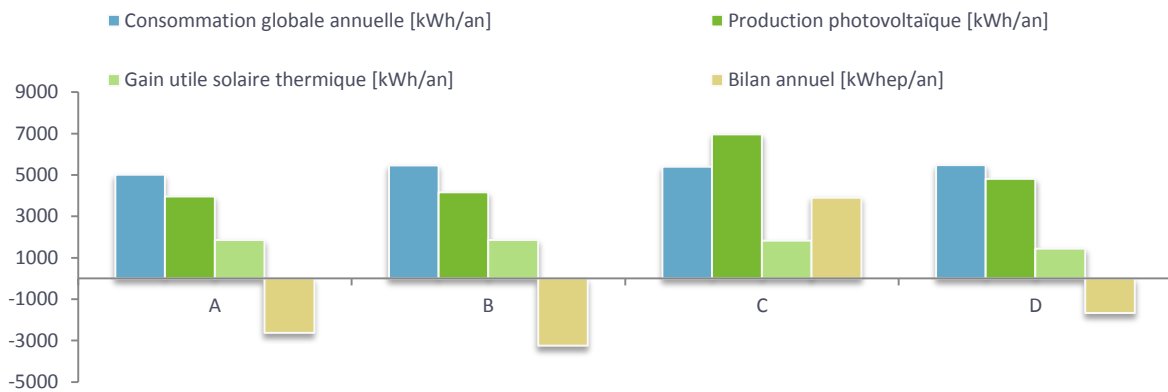


Figure 36. Bilan annuel en énergie primaire - V1b

Cette nouvelle variante ne permet pas à tous les modèles d'atteindre le critère E+. Cependant, elle permet de réduire la consommation annuelle d'énergie dans chaque modèle (de 20 % à 36 % d'énergie en moins par an). Le bilan en EP est ainsi moins lourd pour les maisons qui ne sont pas E+.

Résultats de simulation – V1c

Chauffage électrique | Ballon solaire et appoint PAC | Solaire photovoltaïque et thermique

| Critère énergétique | | | | |
|---|-------------|--------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - chauffage électrique [kWh/an] | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Surface de plancher chauffé (Ach) [m²] | 144.24 | 156.38 | 211 | 178.19 |
| Besoin annuel pour le chauffage [kWh/m².an] - critère pmp max. 15 kWh/m².an | -12 | -13 | -9 | -10 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Total des consommations [kWh/an] | 4313 | 4769 | 4684 | 4596 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4166 | 6961 | 4813 |
| Gain utile solaire thermique [kWh/an] | 1925 | 1925 | 1892 | 1488 |
| Bilan annuel [kWhep/an] | -888 | -1508 | 5693 | 543 |
| Résultat performance énergétique - critère maison E+ VallEnergie | | | | |

| Critères environnemental et économique | | | | |
|--|---------------|---------------|-------------|---------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - chauffage électrique [kWh/an] | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Vecteur énergétique pour le chauffage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 1696 | 2102 | 1998 | 1825 |
| Consommation annuelle d'EP | 4240 | 5255 | 4995 | 4563 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 852 | 1056 | 1003 | 917 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour le chauffage (€/an) | 349 | 433 | 412 | 376 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Vecteur énergétique pour l'ECS | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Consommation annuelle d'EP | 1862.5 | 1862.5 | 1895 | 2227.5 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 374 | 374 | 381 | 448 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'ECS (€/an) | 153 | 153 | 156 | 184 |

| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Vecteur énergétique pour la ventilation | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 1279 | 1279 | 1279 | 1279 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 3762 | 3762 | 3762 | 3762 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire][20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 756 | 756 | 756 | 756 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour la ventilation [€/an] | 310 | 310 | 310 | 310 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Vecteur énergétique pour l'éclairage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 918 | 1043 | 1058 | 938 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire][20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 184 | 209 | 212 | 188 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'éclairage [€/an] | 76 | 86 | 87 | 77 |

| Bilan | | | | |
|--|-------------|--------------|--------------|-------------|
| Total des consommations [kWh/an] | 4313 | 4769 | 4684 | 4596 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4166 | 6961 | 4813 |
| Bilan annuel [kWh/an] | -888 | -1508 | 5693 | 543 |
| Émissions CO₂ évitées [kg/an] | 1561 | 1644 | 2746 | 1899 |
| Émissions CO₂ globales [kg/an] | 178 | 303 | -1144 | -109 |
| Coût annuel de l'énergie [€/an]* | 183 | 311 | -1173 | -112 |

**Le coût annuel est calculé d'après le prix d'achat moyen de l'électricité [24]. Ce coût est donc donné à titre informatif et ne reflète pas le coût réel en cas de revente du surplus de production électrique par les panneaux solaires photovoltaïques.*

Bilan annuel en énergie primaire (Figure 37) :

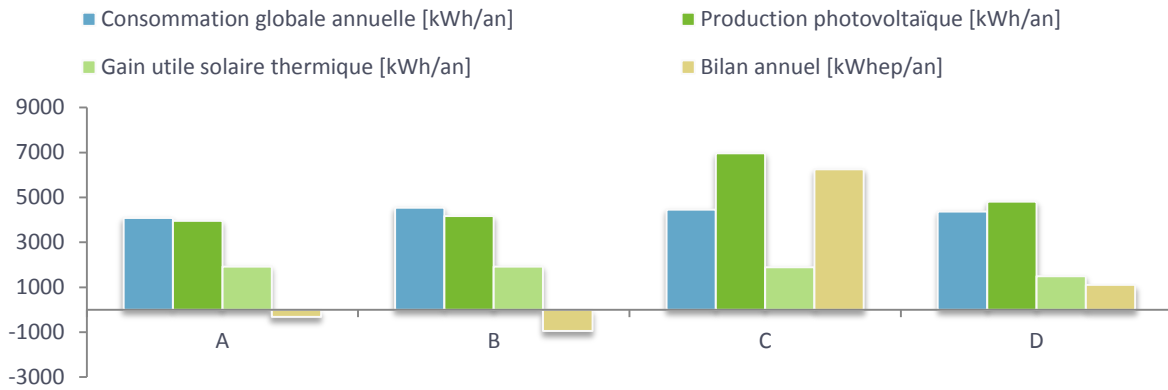


Figure 37. Bilan annuel en énergie primaire - V1c

Cette dernière variante pour le chauffage électrique permet de réduire considérablement la consommation annuelle des quatre modèles. Malgré cela, elle ne permet pas à tous les modèles d'atteindre le critère E+.

Bilan : chauffage électrique

Le bilan en énergie primaire d'un chauffage dont le vecteur énergétique est l'électricité est fortement dégradé par le coefficient de conversion d'EP. Celui-ci étant de 2.5 pour la Région wallonne, il en résulte une consommation en énergie primaire 2.5 fois plus élevée que la consommation d'énergie finale. Le bilan annuel est donc alourdi pour un système utilisant l'énergie électrique. Les résultats de cette première variante de simulation montrent que le chauffage électrique, quelle que soit la solution envisagée pour la production d'ECS, pèse lourd sur le bilan annuel en EP et sa consommation ne peut être compensée que par une production photovoltaïque conséquente. Dans ce cas, les maisons du GdL sont plus favorables à la mise en place d'un tel système étant donné qu'elles sont pourvues d'une surface de toit suffisante pour l'installation d'une puissance crête élevée.

Cependant, d'un point de vue économique, le coût de l'électricité est l'un des plus élevés comparé aux autres vecteurs énergétiques [24][25].

Sur le plan environnemental, le dernier scénario V1c permet de réduire les émissions de CO₂ engendrées par les systèmes, compte tenu de la faible consommation résiduelle.

Poêle à pellets

Description du système

Le deuxième système de chauffage étudié est un poêle à pellets. Il s'agit d'un système local de production et émission de chaleur. Pour chacune des 4 maisons, le poêle est situé dans la zone principale : le séjour. Le poêle simulé est un modèle simplifié, basé sur les travaux de L. Georges et V. Novakovic [26]. Le contrôle du poêle est réalisé via un PID, modélisé grâce à l'équation de Ziegler et Nichols [26]. Le but est de reproduire le comportement d'un poêle lors de sa mise en route et de son arrêt.

Afin de tenir compte des phénomènes de convection induits par le poêle, un couplage d'air (« coupling airflow ») entre le rez-de-chaussée et le 1^{er} étage a été introduit dans les modèles. Ce couplage correspond à un renouvellement de l'air entre les deux étages équivalent à 10 fois le volume normal. Ceci est valable dans les 4 modèles de maisons où le transfert d'air se fait grâce à la présence d'un escalier communiquant entre les 2 étages.

Le poêle modélisé est identique pour chacune des maisons. Celles-ci ont de très faibles besoins pour le chauffage (inférieur à 4kW pour l'ensemble des maisons). Cependant, les poêles les plus petits du marché ont des puissances nominales comprises entre 6 à 8 kW [26]. De ce fait la puissance retenue pour le modèle simplifié de poêle est de 6 kW. Certains poêles à pellets vendus sur le marché sont dotés d'une régulation s'effectuant via une sonde de température. Celle-ci mesure la température de la pièce où est installé le poêle et permet la régulation de la combustion par la gestion du débit de pellets injectés dans le foyer. Cette hypothèse a été retenue pour le modèle utilisé, celui-ci est régulé en fonction des températures de consigne prévues par les hypothèses et appliquées à la zone « séjour ».

Le temps de démarrage d'un tel type de poêle s'échelonne de 15 à 30 minutes (selon différentes fiches techniques de poêles à pellets), ce qui est sensiblement similaire à un système de chauffage central tel qu'une chaudière à gaz ou au mazout. Le temps d'arrêt est le plus souvent de 30 minutes. Cette dernière donnée a été prise en compte dans les simulations. Le rendement du poêle utilisé pour les calculs est de 85 %, valeur utilisée par le logiciel PEB comme valeur par défaut [23] mais inférieure aux valeurs annoncées par les fabricants de poêles à pellets, comprises entre 90 à 94 %.

| Variante | Chauffage | ECS | EnR |
|------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Variante 2 - V2 | | | |
| V2a | Poêle à pellets | Ballon électrique | Solaire photovoltaïque |
| V2b | Poêle à pellets | Ballon solaire | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V2c | Poêle à pellets | Ballon solaire et appoint électrique | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V2d | Poêle à pellets | Ballon solaire et appoint par PAC | Solaire thermique et photovoltaïque |

Tableau 54. Variantes : Poêle à pellets

Résultats de simulation – V2a

Poêle à pellets | Ballon électrique | Solaire photovoltaïque

| Critère énergétique | | | | |
|---|--------------|--------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - poêle à pellets [kWh/an] | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Surface de plancher chauffé (Ach) [m²] | 144.24 | 156.38 | 211 | 178.19 |
| Besoin annuel pour le chauffage [kWh/m².an] - critère pmp max. 15 kWh/m².an | -11 | -10 | -7 | -5 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 3085 | 3085 | 3085 | 3085 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Total des consommations [kWh/an] | 6478 | 6626 | 6515 | 5910 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 4948 | 5208 | 7992 | 5673 |
| Bilan annuel [kWh/an] | -1544 | -1117 | 5946 | 825 |
| Résultat performance énergétique - critère maison E+ VallEnergie | | | | |

| Critères environnemental et économique | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - Poêle à pellets [kWh/an] | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Vecteur énergétique pour le chauffage | bois | bois | bois | bois |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique (RW) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| PCI pellets [kWh/kg] | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.3 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 1293 | 1376 | 1277 | 803 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Consommation annuelle d'EP | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Quantité annuelle de pellets [kg/an] | 287 | 305 | 283 | 178 |
| Prix énergie (€/tonnes) - pellets[24] | 280.0 | 280.0 | 280.0 | 280.0 |
| Coût annuel de l'énergie pour le chauffage (€/an) | 80 | 86 | 79 | 50 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 3085 | 3085 | 3085 | 3085 |
| Vecteur énergétique pour l'ECS | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 3085 | 3085 | 3085 | 3085 |

| | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Consommation annuelle d'EF brute | 3085 | 3085 | 3085 | 3085 |
| Consommation annuelle d'EP | 7713 | 7713 | 7713 | 7713 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 1549 | 1549 | 1549 | 1549 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'ECS (€/an) | 636 | 636 | 636 | 636 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Vecteur énergétique pour la ventilation | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 1279 | 1279 | 1279 | 1279 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 3762 | 3762 | 3762 | 3762 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 756 | 756 | 756 | 756 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour la ventilation [€/an] | 310 | 310 | 310 | 310 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Vecteur énergétique pour l'éclairage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 367 | 417 | 498 | 375 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 918 | 1043 | 1058 | 938 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire][20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 184 | 209 | 212 | 188 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'éclairage [€/an] | 76 | 86 | 87 | 77 |

| Bilan | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Total des consommations [kWh/an] | 6478 | 6626 | 6515 | 5910 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 4948 | 5208 | 7992 | 5673 |
| Bilan annuel [kWh _{ep} /an] | -1544 | -1116 | 5945 | 825 |
| Émissions CO₂ évitées [kg/an] | 1952 | 2055 | 3153 | 2238 |
| Émissions CO₂ globales [kg/an] | 310 | 224 | -1194 | -166 |
| Coût annuel de l'énergie [€/an]* | 398 | 315 | -1145 | -120 |

**Le coût annuel est calculé d'après le prix d'achat moyen de l'électricité [24]. Ce coût est donc donné à titre informatif et ne reflète pas le coût réel en cas de revente du surplus de production électrique par les panneaux solaires photovoltaïques.*

Bilan annuel en énergie primaire (Figure 38) :

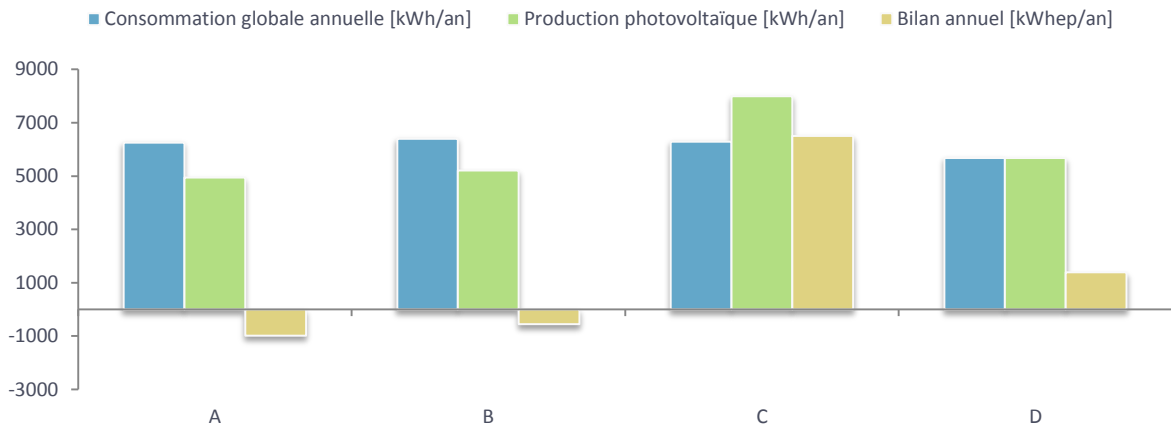


Figure 38. Bilan annuel en énergie primaire - V2a

Cette première variante pour le poêle à pellets (avec système ECS 1 pour l'eau chaude sanitaire), permet à deux modèles (C et D) de répondre au critère E+ du point de vue énergétique. Cependant, les analyses des températures intérieures ont démontré que ce système ne permet pas de maintenir la consigne de température en période de fonctionnement (hiver). Ceci sera développé dans le bilan de la variante « poêle à pellets ».

Résultats de simulation – V2b

Poêle à pellets | Ballon solaire | Solaire photovoltaïque et thermique

| Critère énergétique | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - poêle à pellets [kWh/an] | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Surface de plancher chauffé (Ach) [m²] | 144.24 | 156.38 | 211 | 178.19 |
| Besoin annuel pour le chauffage [kWh/m².an] - critère pmp max. 15 kWh/m².an | -11 | -10 | -7 | -5 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 1666 | 1666 | 1698 | 2002 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Total des consommations [kWh/an] | 5059 | 5207 | 5128 | 4827 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4749 | 6867 | 5078 |
| Bilan annuel [kWh/an] | -471 | 1284 | 6601 | 2045 |
| Résultat performance énergétique - critère maison E+ VallEnergie | | | | |

| Critères environnemental et économique | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - Poêle à pellets [kWh/an] | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Vecteur énergétique pour le chauffage | bois | bois | bois | bois |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique (RW) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| PCI pellets [kWh/kg] | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.3 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 1293 | 1376 | 1277 | 803 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Consommation annuelle d'EP | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Quantité annuelle de pellets [kg/an] | 287 | 305 | 283 | 178 |
| Prix énergie (€/tonnes) - pellets[24] | 280.0 | 280.0 | 280.0 | 280.0 |
| Coût annuel de l'énergie pour le chauffage (€/an) | 80 | 86 | 79 | 50 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 1666 | 1666 | 1698 | 2002 |
| Vecteur énergétique pour l'ECS | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 1666 | 1666 | 1698 | 2002 |

| | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Consommation annuelle d'EF brute | 1666 | 1666 | 1698 | 2002 |
| Consommation annuelle d'EP | 4165 | 4165 | 4245 | 5005 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 837 | 837 | 853 | 1006 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'ECS (€/an) | 343 | 343 | 350 | 412 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Vecteur énergétique pour la ventilation | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 1279 | 1279 | 1279 | 1279 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 3762 | 3762 | 3762 | 3762 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 756 | 756 | 756 | 756 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour la ventilation [€/an] | 310 | 310 | 310 | 310 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Vecteur énergétique pour l'éclairage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 918 | 1043 | 1058 | 938 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire][20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 184 | 209 | 212 | 188 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'éclairage [€/an] | 76 | 86 | 87 | 77 |

| Bilan | | | | |
|--|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Total des consommations [kWh/an] | 5059 | 5207 | 5128 | 4827 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4749 | 6867 | 5078 |
| Bilan annuel [kWh _{ep} /an] | -471 | 1284 | 6600 | 2045 |
| Émissions CO₂ évitées [kg/an] | 1561 | 1874 | 2709 | 2003 |
| Émissions CO₂ globales [kg/an] | 95 | -258 | -1326 | -411 |
| Coût annuel de l'énergie [€/an]* | 177 | -179 | -1280 | -371 |

**Le coût annuel est calculé d'après le prix d'achat moyen de l'électricité [24]. Ce coût est donc donné à titre informatif et ne reflète pas le coût réel en cas de revente du surplus de production électrique par les panneaux solaires photovoltaïques.*

Bilan annuel en énergie primaire (Figure 39) :

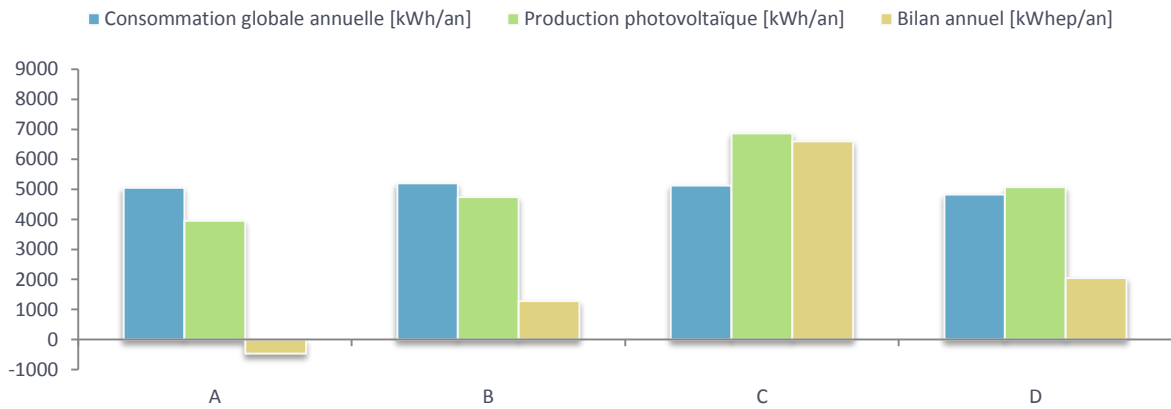


Figure 39. Bilan annuel en énergie primaire - V2b

D'après cette simulation, les maisons VallEnergie répondent toutes au critère E+ grâce à cette variante (utilisation de ECS 2), sauf la maison A. Par ailleurs, le constat concernant la capacité du poêle à maintenir le confort dans les modèles est identique à celui de la première variante de simulation.

Résultats de simulation – V2c

Poêle à pellets | Ballon solaire et appoint PAC | Solaire photovoltaïque et thermique

| Critère énergétique | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - poêle à pellets [kWh/an] | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Surface de plancher chauffé (Ach) [m²] | 144.24 | 156.38 | 211 | 178.19 |
| Besoin annuel pour le chauffage [kWh/m².an] - critère pmp max. 15 kWh/m².an | -11 | -10 | -7 | -5 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Total des consommations [kWh/an] | 4138 | 4286 | 4188 | 3716 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4749 | 6867 | 5078 |
| Bilan annuel [kWh/an] | 1832 | 3586 | 8951 | 4823 |
| Résultat performance énergétique - critère maison E+ VallEnergie | | | | |

| Critères environnemental et économique | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - Poêle à pellets [kWh/an] | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Vecteur énergétique pour le chauffage | bois | bois | bois | bois |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique (RW) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| PCI pellets [kWh/kg] | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.3 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 1293 | 1376 | 1277 | 803 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Consommation annuelle d'EP | 1521 | 1619 | 1502 | 945 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Quantité annuelle de pellets [kg/an] | 287 | 305 | 283 | 178 |
| Prix énergie (€/tonnes) - pellets[24] | 280.0 | 280.0 | 280.0 | 280.0 |
| Coût annuel de l'énergie pour le chauffage (€/an) | 80 | 86 | 79 | 50 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Vecteur énergétique pour l'ECS | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 745 | 745 | 758 | 891 |

| | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Consommation annuelle d'EF brute | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Consommation annuelle d'EP | 1863 | 1863 | 1895 | 2228 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire) [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 374 | 374 | 381 | 448 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'ECS (€/an) | 153 | 153 | 156 | 184 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Vecteur énergétique pour la ventilation | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 1279 | 1279 | 1279 | 1279 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 3762 | 3762 | 3762 | 3762 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire] [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 756 | 756 | 756 | 756 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour la ventilation [€/an] | 310 | 310 | 310 | 310 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Vecteur énergétique pour l'éclairage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 918 | 1043 | 1058 | 938 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire][20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 184 | 209 | 212 | 188 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'éclairage [€/an] | 76 | 86 | 87 | 77 |

| Bilan | | | | |
|--|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Total des consommations [kWh/an] | 4138 | 4286 | 4188 | 3716 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4749 | 6867 | 5078 |
| Bilan annuel [kWh _{ep} /an] | 1831 | 3586 | 8950 | 4823 |
| Émissions CO₂ évitées [kg/an] | 1561 | 1874 | 2709 | 2003 |
| Émissions CO₂ globales [kg/an] | -368 | -720 | -1798 | -969 |
| Coût annuel de l'énergie [€/an]* | -297 | -653 | -1764 | -944 |

**Le coût annuel est calculé d'après le prix d'achat moyen de l'électricité [24]. Ce coût est donc donné à titre informatif et ne reflète pas le coût réel en cas de revente du surplus de production électrique par les panneaux solaires photovoltaïques.*

Bilan annuel en énergie primaire (Figure 40) :

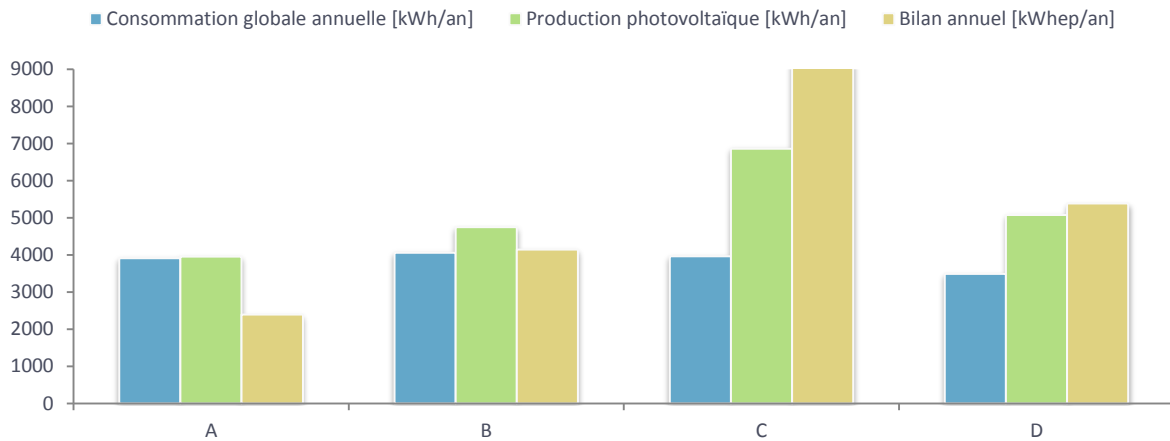


Figure 40. Bilan annuel en énergie primaire - V2c

Avec un système combiné pour l'ECS : PAC-chauffe-eau solaire (ECS 3), les maisons sont toutes E+. Cependant le constat est toujours identique aux précédentes simulations : le confort n'est pas atteint. Pour pallier à cette lacune, la simulation V2d intègre des chauffages électriques aux modèles afin de servir d'appoint et compenser les pertes que le poêle n'est pas en mesure de couvrir.

Résultats de simulation – V2d

Poêle à pellets et appoints électriques | Ballon solaire et appoint PAC | Solaire photovoltaïque et thermique

| Critère énergétique | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - poêle à pellets [kWh/an] | 842 | 1031 | 1007 | 739 |
| Consommation annuelle - appoint électrique [kWh/an] | 971 | 1269 | 1198 | 1349 |
| Surface de plancher chauffé (Ach) [m²] | 144.24 | 156.38 | 211 | 178.19 |
| Besoin annuel pour le chauffage [kWh/m².an] - critère pmp max. 15 kWh/m².an | -6 | -7 | -5 | -4 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Total des consommations [kWh/an] | 3459 | 3698 | 3693 | 3510 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4749 | 6867 | 5078 |
| Bilan annuel [kWh/an] | 83 | 1002 | 6451 | 1656 |
| Résultat performance énergétique - critère maison E+ VallEnergie | | | | |

| Critères environnemental et économique | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - Poêle à pellets [kWh/an] | 842 | 1031 | 1007 | 739 |
| Vecteur énergétique pour le chauffage | bois | bois | bois | bois |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique (RW) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| PCI pellets [kWh/kg] | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.3 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 716 | 876.35 | 855.95 | 628.15 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 842 | 1031 | 1007 | 739 |
| Consommation annuelle d'EP | 842 | 1031 | 1007 | 739 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Quantité annuelle de pellets [kg/an] | 159 | 195 | 190 | 139 |
| Prix énergie (€/tonnes) - pellets[24] | 280.0 | 280.0 | 280.0 | 280.0 |
| Coût annuel de l'énergie pour le chauffage (€/an) | 44 | 54 | 53 | 39 |
| Consommation annuelle - Appoints électriques [kWh/an] | 971 | 1269 | 1198 | 1349 |
| Vecteur énergétique pour le chauffage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique (RW) | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Consommation annuelle d'EF nette | 971 | 1269 | 1198 | 1349 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 971 | 1269 | 1198 | 1349 |
| Consommation annuelle d'EP | 2428 | 3173 | 2995 | 3373 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 488 | 637 | 602 | 678 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour le chauffage (€/an) | 200 | 261 | 247 | 278 |
| Consommation annuelle totale - Chauffage [kWh/an] | 1813 | 2300 | 2205 | 2088 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Vecteur énergétique pour l'ECS | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 745 | 745 | 758 | 891 |
| Consommation annuelle d'EP | 1863 | 1863 | 1895 | 2228 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire) [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 374 | 374 | 381 | 448 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'ECS (€/an) | 153 | 153 | 156 | 184 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Vecteur énergétique pour la ventilation | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 1279 | 1279 | 1279 | 1279 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 3762 | 3762 | 3762 | 3762 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire] [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 756 | 756 | 756 | 756 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour la ventilation [€/an] | 310 | 310 | 310 | 310 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Vecteur énergétique pour l'éclairage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 918 | 1043 | 1058 | 938 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire] [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 184 | 209 | 212 | 188 |

| | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'éclairage [€/an] | 76 | 86 | 87 | 77 |

| Bilan | | | | |
|--|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Total des consommations [kWh/an] | 4430 | 4967 | 4891 | 4859 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4749 | 6867 | 5078 |
| Bilan annuel [kWh/an] | 83 | 1002 | 6451 | 1656 |
| Émissions CO ₂ évitées [kg/an] | 1561 | 1874 | 2709 | 2003 |
| Émissions CO ₂ globales [kg/an] | -17 | -201 | -1296 | -333 |
| Coût annuel de l'énergie [€/an]* | 27 | -152 | -1276 | -302 |

**Le coût annuel est calculé d'après le prix d'achat moyen de l'électricité [24]. Ce coût est donc donné à titre informatif et ne reflète pas le coût réel en cas de revente du surplus de production électrique par les panneaux solaires photovoltaïques.*

Bilan annuel en énergie primaire (Figure 41) :

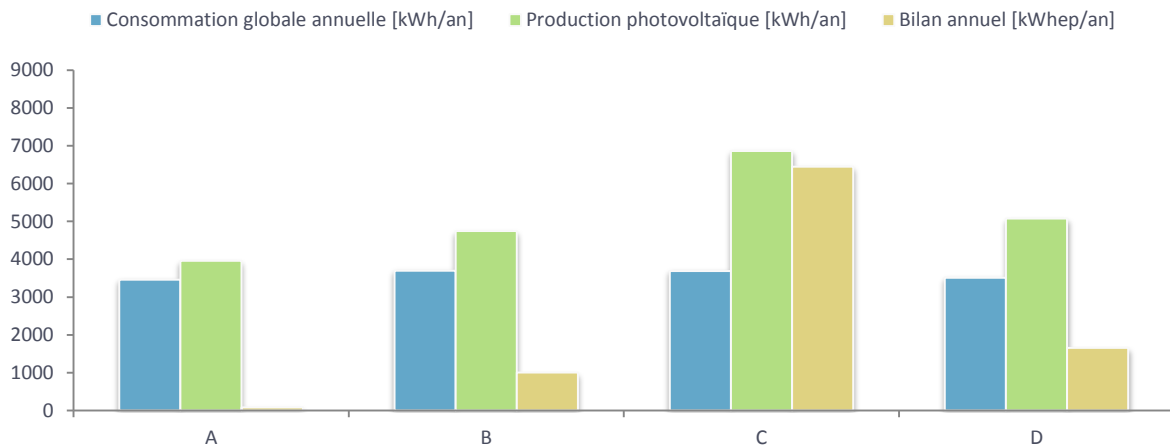


Figure 41. Bilan annuel en énergie primaire - V2d

Bilan : poêle à pellets

La consommation d'énergie :

En termes d'énergie primaire, l'usage d'un poêle à pellets est bien plus favorable que le chauffage électrique. Cependant ce système ne semble pas en mesure de compenser intégralement les pertes thermiques dans les maisons (Figure 42).

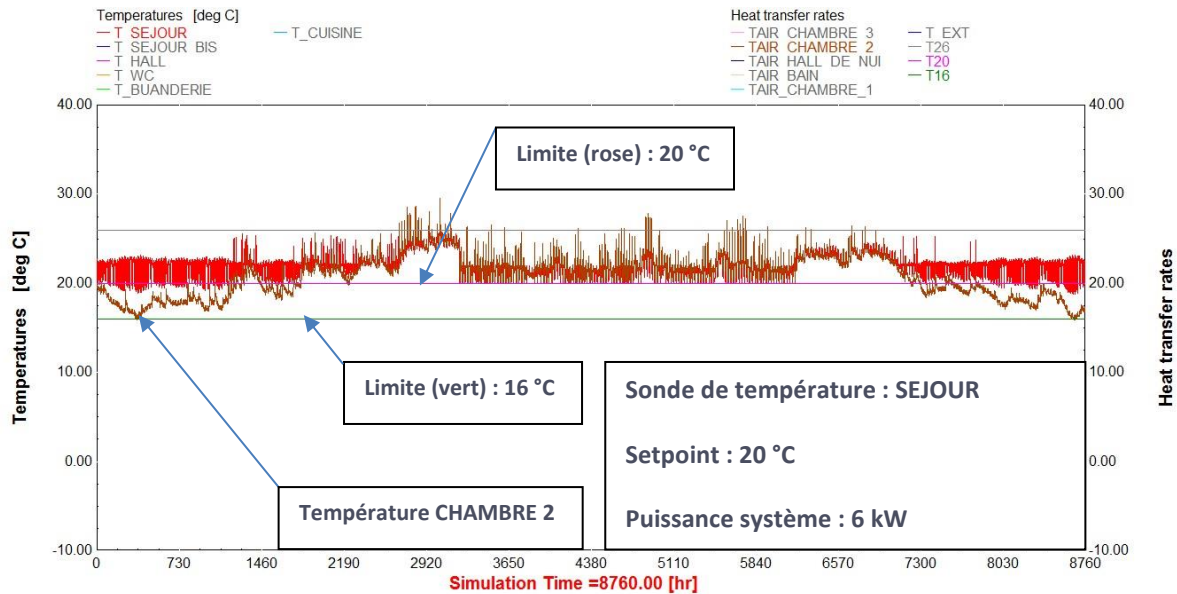
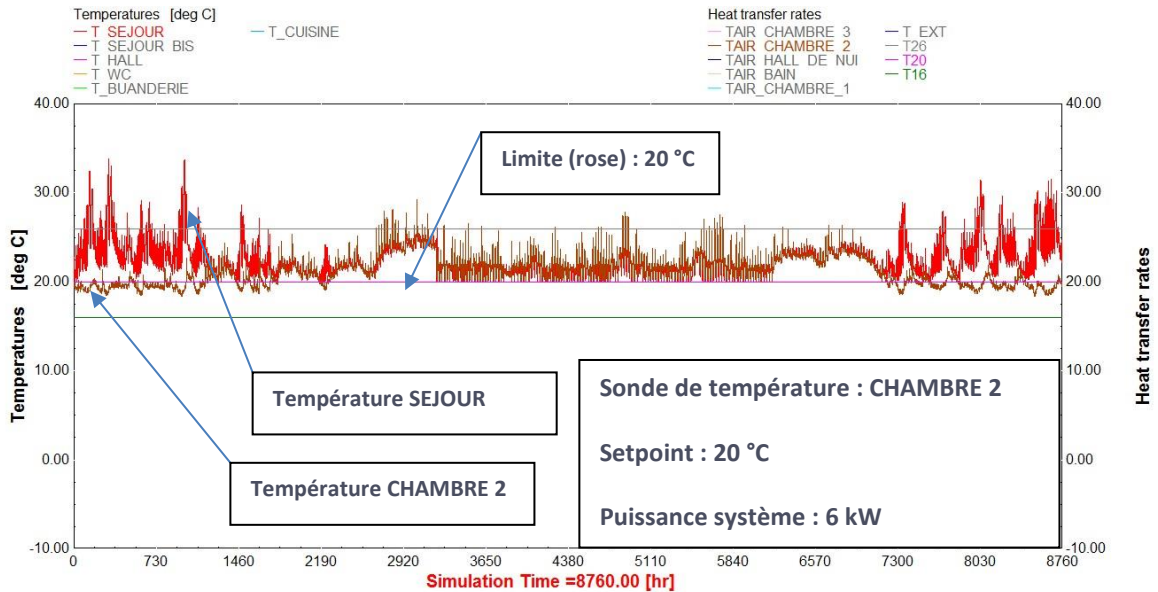


Figure 42. Températures intérieures observées dans le modèle A avec un poêle à pellets pour la production de chauffage – température du séjour (rouge) ; température de la chambre 2 (marron)

Voici quelques solutions qui peuvent être envisagées :

- Utilisation de chauffages d'appoint électriques : il s'agit d'une solution peu coûteuse, cependant le bilan en énergie primaire s'en retrouve dégradé. Dans le cas de la simulation V2d pour la maison A, celle-ci atteint de peu le critère E+ du point de vue énergétique. Ceci signifie qu'un cas d'hivers plus rudes, ou d'un moins bon ensoleillement (impact sur la production des panneaux solaires thermiques et photovoltaïques) il n'est pas impossible que la maison ne respecte plus le critère de maison E+.
- Augmentation de la puissance du poêle : la consommation en pellets sera plus importante. De plus, dans la zone où se situe le poêle, une surchauffe peut avoir lieu. Des simulations supplémentaires ont permis de mettre en évidence que l'augmentation de la puissance du poêle n'a aucune conséquence sur la température dans les zones éloignées. En effet, la régulation du poêle se base sur la température de la zone où se situe celui-ci et non des zones les plus éloignées. Dans ce cas le poêle s'arrête lorsque la température de consigne dans le séjour est atteinte, et les zones les plus éloignées ne sont pas chauffées.
- Augmentation de la consigne de température de 20 °C à 22 °C : permet de légèrement augmenter la température dans les zones éloignées sans pour autant atteindre les 20°C souhaités.
- Régulation de la température en fonction de la zone la plus « froide » de la maison : CHAMBRE 2 (modèle A) : Le poêle est contrôlé d'après la température de la zone « CHAMBRE 2 » et non plus la zone « SEJOUR » (Figure 43). Dans ce cas la température de consigne est toujours de 20 °C mais doit être atteinte dans la chambre n°2. Ce changement induit une augmentation sans précédent de la

température dans le séjour : >33 °C. La température dans la chambre atteint péniblement les 20 °C (pour des puissances testées de 6 kW et 8 kW).



- Utilisation d'un poêle hydraulique : ce système s'apparente à un chauffage central. Le coût d'investissement est supérieur à celui d'un poêle conventionnel. Ce système requiert un approvisionnement supérieur en pellets (augmentation de la consommation d'énergie).

Le confort :

Le poêle ne permet pas de compenser l'intégralité des pertes de la maison. Ceci se traduit par des températures en deçà de la température de consigne souhaitée dans les zones adjacentes et éloignées du poêle. Cette solution de chauffage pourrait être maintenue, bien que le confort dans la maison ne soit pas optimal (domaine de températures : 16 °C à 19 °C en fonctionnement du poêle dans les zones adjacentes et éloignées). Cependant ce choix se confronte au risque d'une insatisfaction des occupants. Ceci n'est pas anodin car en situation d'inconfort une grande partie de la population se tourne vers un appoint de chauffage plutôt que de se couvrir plus (mettre un pull par exemple). Ce choix n'est pas sans conséquence sur l'augmentation de la demande en énergie (appoint supplémentaire = énergie consommée en plus).

Dans le cadre du projet VallEnergie, la maison se doit d'être économe en énergie et offrir un confort optimal pour convenir au plus grand nombre.

L'usage :

Le poêle à pellets se veut plus pratique comparé à un poêle à bois conventionnel. Cependant, l'occupant reste en charge de l'approvisionnement en pellets (2 à 3 fois par jour selon les modèles et leur autonomie). À ceci s'ajoute la nécessité du ramonage et de la vidange des cendres (la fréquence va dépendre du modèle). Comparé aux autres systèmes envisagés dans l'étude, le poêle à pellets est défavorable à une utilisation facilitée au quotidien. Dans le cas du poêle à pellets, l'utilisation du système ne répond pas aux critères de praticité souhaitée dans le cadre du projet (objectif : maison pour tous, facile d'usage).

Constat général : le système doit être optimal à la fois sur le plan :

- du confort,
- de la consommation d'énergie,
- de l'usage.

Les résultats de simulation dans le logiciel TRNSYS 17 ne permettent pas de conclure sur la capacité du poêle à pellets modélisé à maintenir une température suffisante dans l'ensemble des zones des maisons étudiées. Tel quel, ce système ne répond pas à l'ensemble des critères exigés par le CDC des maisons E+ du projet.

Chauffage par air chaud pulsé via la VMC

Ce système de chauffage consiste à utiliser l'air de la VMC pour chauffer l'habitation. L'air de ventilation doit atteindre une température suffisante pour pouvoir couvrir les déperditions thermiques de la maison. Pour cela, une résistance électrique peut être intégrée au système de ventilation. D'autres solutions de chauffage de l'air existent, par exemple le couplage avec une pompe à chaleur, cependant, ces moyens techniques ne font pas l'objet d'une analyse dans cette étude. Dans le cadre de cette simulation, les débits hygiéniques ont été conservés pour les calculs de la température de soufflage de l'air.

| Variante | Chauffage | ECS | EnR |
|------------------------|-----------------|-----|-----|
| Variante 3 - V3 | | | |
| V3 | Air chaud pulsé | - | - |

Tableau 55. Variante : Air chaud pulsé

Pour parvenir à modéliser ce système, plusieurs étapes ont été nécessaires. La première consiste à déterminer la demande de chaleur de la maison. L'utilisation de TRNSYS 17 permet d'avoir les résultats heure par heure de la demande de chaleur du modèle pour maintenir sa température à 20 °C et ceci en fonction des conditions extérieures (climat de St Hubert). La puissance est liée à la température de soufflage (1). Ainsi, il est possible de déterminer la température de soufflage nécessaire pour répondre à la demande de chaleur du modèle (2). Ce calcul a été effectué pour le modèle A du projet.

$$(1) \quad P = C_p \times \rho_{\text{air}} \times D \times (T_s - T_a)$$

Avec :

P : puissance du système (W)

C_p : chaleur spécifique de l'air (0.279 Wh/kgK)

ρ_{air} : densité de l'air (1.2 kg/m³)

D : débit d'air (m³/h), débits hygiéniques

T_s : température de soufflage (K)

T_a : température ambiante (K)

La température de soufflage est calculée suivant la formule (2)

$$(2) \quad T_s = T_a + \frac{P}{C_p \times \rho_{\text{air}} \times D} = 20 + \frac{P}{0.34 \times 266}$$

Avec :

T_s : température de soufflage (°C)

T_a : température ambiante (°C) ; correspond à la température de consigne de 20 °C

P : puissance du système (W) ; obtenue par simulation dans TRNSYS 17

C_p : chaleur spécifique de l'air (0.279 Wh/kgK)

ρ_{air} : densité de l'air (1.2 kg/m³)

D : débit d'air (m³/h), débits hygiéniques (pour modèle A : 266 m³/h)

Suite à ces calculs, la courbe reliant la température de soufflage à la température de l'air extérieur peut être tracée. Les résultats sont donnés uniquement au moment de fonctionnement du chauffage (période d'octobre à avril et consigne à 20 °C - Figure 44).

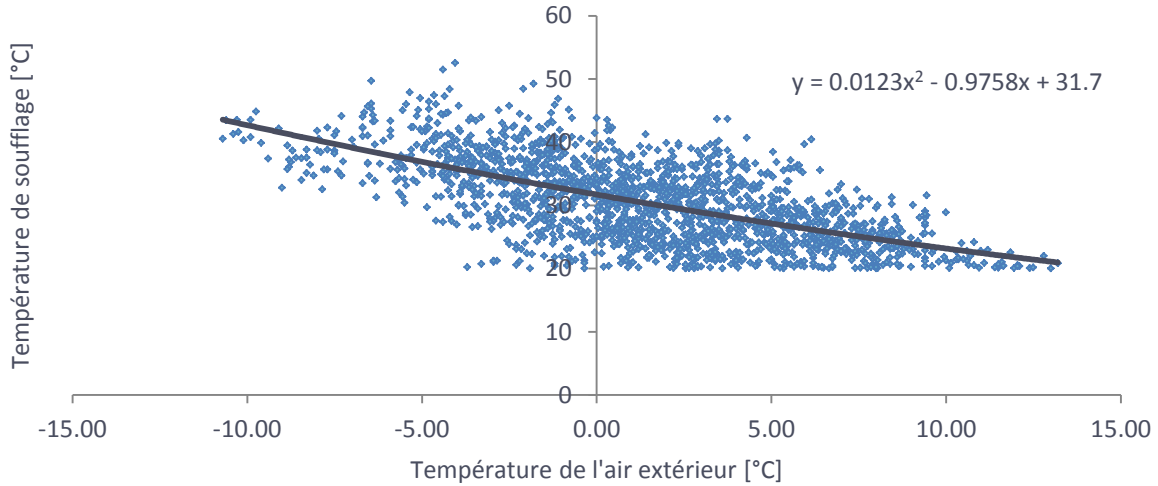


Figure 44. Relation entre la température de l'air extérieur et la température de soufflage du système VMC pour le chauffage de la maison

Cette courbe permet de déterminer l'équation qui relie la température de soufflage à celle de l'air extérieur qui entre dans le système de ventilation. Ceci permet de créer le système pour la simulation et de déterminer en fonction de la température de l'air neuf qui entre dans la VMC, à quelle température celui-ci doit être chauffé pour compenser les pertes thermiques de la maison, ceci en fonction de la température de consigne de 20 °C.

Logiquement, la température de pulsion dans les pièces augmente avec la diminution de la température extérieure. Le problème de ce système réside dans une température de soufflage atteignant des valeurs supérieures à 40 °C. Ceci est d'autant plus problématique que la température de l'air pulsé ne devrait pas dépasser 35 °C (pour des raisons physiologiques, cette valeur est la limite, au-delà de cette température une gêne peut survenir et être suivie de malaises). Le système est également limité par la capacité de transport de chaleur du fluide caloporteur : l'air. En effet, par calcul il est possible de démontrer que la ventilation hygiénique n'est pas en mesure de couvrir 100 % des besoins de chaque maison, et ceci pour une température de pulsion de 40 °C [27].

Capacité de transport de l'air (Tableau 56):

$$\frac{\text{débit } [m^3]}{3600 \frac{[s]}{[h]}} \times \text{masse volumique de l'air } \frac{[kg]}{[m^3]} \times \text{chaleur spécifique de l'air } \frac{[kJ]}{[kg]} \times (T_{\text{pulsion}} - T_{\text{ambiance}})$$

| Modèle | Débit de ventilation hygiénique [m³/h] | Besoin maximum pour le chauffage [Watts] | Capacité de transport de l'air [Watts]/ Couverture du besoin (%) |
|----------|--|--|--|
| Modèle A | 185 | 2900 | 1192 / 41 % |
| Modèle B | 200 | 3355 | 1289 / 38 % |
| Modèle C | 225 | 2957 | 1450 / 49 % |
| Modèle D | 175 | 3123 | 1128 / 36 % |

Tableau 56. Capacité de transport de l'air pour une température de pulsion de 40 °C

Pour parvenir à couvrir 100 % du besoin maximum pour le chauffage de chaque maison, il faut augmenter le débit. La même formule qui permet de calculer la capacité de transport de l'air peut être réutilisée avec cette fois le débit de ventilation comme inconnue (Tableau 57).

$$\text{débit [m}^3\text{]} = \frac{\text{besoin maximum pour le chauffage [W]}}{\text{masse volumique de l'air } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] \times \text{chaleur spécifique de l'air } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right] \times (T_{\text{pulsion}} - T_{\text{ambiance}})}$$

| Modèle | Besoin maximum pour le chauffage [Watts] | Débit théorique de ventilation [m³/h] |
|----------|--|---------------------------------------|
| Modèle A | 2900 | 450 |
| Modèle B | 3355 | 520 |
| Modèle C | 2957 | 460 |
| Modèle D | 3123 | 485 |

Tableau 57. Calcul des débits théoriques de ventilation pour compenser le besoin maximum pour le chauffage

Les débits de ventilation dans les modèles devraient donc être doublés pour permettre de couvrir complètement les besoins pour le chauffage. Cependant, l'augmentation des débits induit à la fois une augmentation de la taille des gaines de ventilation (ceci représente un coût supplémentaire) mais également une augmentation de la vitesse de l'air. Pour assurer le confort aérouique dans les zones d'occupation, la vitesse de l'air ne doit pas excéder la valeur de 0.2 m/s [28]. Voici un calcul des vitesses de l'air pour les débits théoriques de ventilation précédents (Tableau 58), en fonction de différents diamètres intérieurs de conduits circulaires (source : www.energieplus-lesite.be).

| Modèle | Débit (m³/min) | Diamètre (m) | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------|---|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0.063 | 0.08 | 0.1 | 0.125 | 0.16 | 0.2 | 0.25 | 0.315 | 0.4 | 0.5 | 0.63 | 0.8 | 1 | 1.25 |
| Modèle A | Débit (m³/min) | 7.5 | | | | | | | | | | | | | |
| | Diamètre (m) | 0.063, 0.08, 0.1, 0.125, 0.16, 0.2, 0.25, 0.315, 0.4, 0.5, 0.63, 0.8, 1, 1.25 | | | | | | | | | | | | | |
| | Vitesse (m/s) | 40.10 | 24.86 | 15.91 | 10.18 | 6.21 | 3.97 | 2.54 | 1.60 | 0.99 | 0.63 | 0.40 | 0.24 | 0.15 | 0.10 |
| Modèle B | Débit (m³/min) | 8.7 | | | | | | | | | | | | | |
| | Diamètre (m) | 0.063, 0.08, 0.1, 0.125, 0.16, 0.2, 0.25, 0.315, 0.4, 0.5, 0.63, 0.8, 1, 1.25 | | | | | | | | | | | | | |
| | Vitesse (m/s) | 46.33 | 28.73 | 18.39 | 11.77 | 7.18 | 4.59 | 2.94 | 1.83 | 1.14 | 0.76 | 0.46 | 0.28 | 0.18 | 0.12 |
| Modèle C | Débit (m³/min) | 7.7 | | | | | | | | | | | | | |
| | Diamètre (m) | 0.063, 0.08, 0.1, 0.125, 0.16, 0.2, 0.25, 0.315, 0.4, 0.5, 0.63, 0.8, 1, 1.25 | | | | | | | | | | | | | |
| | Vitesse (m/s) | 40.99 | 25.42 | 16.26 | 10.41 | 6.35 | 4.06 | 2.60 | 1.64 | 1.01 | 0.65 | 0.41 | 0.25 | 0.16 | 0.10 |
| Modèle D | Débit (m³/min) | 8.1 | | | | | | | | | | | | | |
| | Diamètre (m) | 0.063, 0.08, 0.1, 0.125, 0.16, 0.2, 0.25, 0.315, 0.4, 0.5, 0.63, 0.8, 1, 1.25 | | | | | | | | | | | | | |
| | Vitesse (m/s) | 43.21 | 26.80 | 17.15 | 10.97 | 6.70 | 4.28 | 2.74 | 1.72 | 1.07 | 0.68 | 0.43 | 0.26 | 0.17 | 0.11 |

■ Vitesse de l'air > 0.2 m/s : situation d'inconfort ■ Vitesse de l'air < 0.2 m/s : situation confortable

Tableau 58. Calcul de la vitesse de l'air en fonction du débit théorique de ventilation et du diamètre des conduites

Pour atteindre des vitesses de l'air inférieures à 0.2 m/s, il faudrait des conduites circulaires dont le diamètre intérieur serait supérieur à 80 cm. Pour des raisons évidentes de place, cette option n'est pas envisageable. D'autant plus que pour parvenir aux débits calculés précédemment, des ventilateurs plus puissants devront être utilisés, s'accompagnant d'une augmentation de la consommation électrique.

Pompe à chaleur et émission par radiateurs

Le dernier système étudié combine production d'eau chaude sanitaire et chauffage. Il s'agit d'un système constitué d'une pompe à chaleur de type air/eau, d'un ballon solaire et de radiateurs à panneaux (Figure 45).

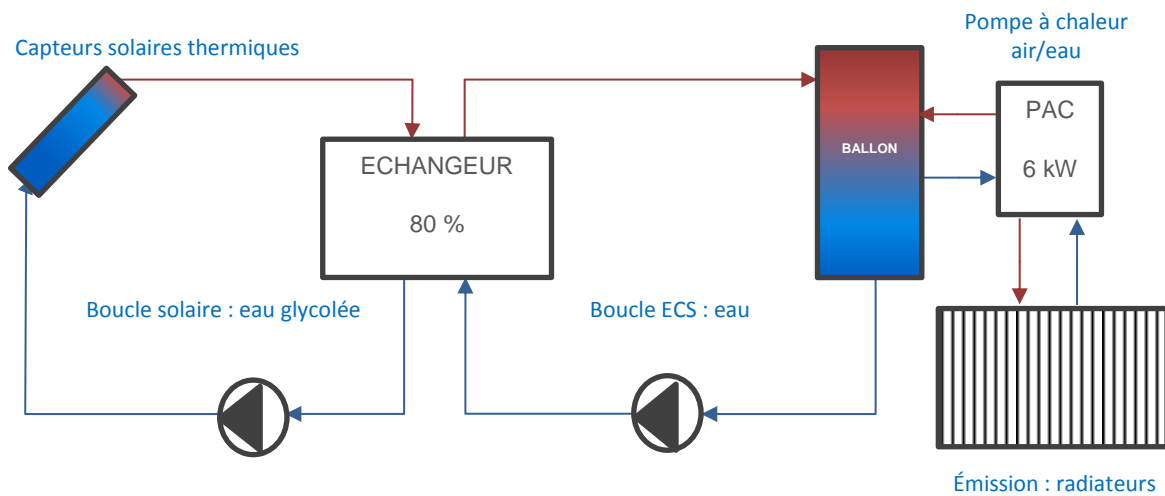


Figure 45. Schéma simplifié du système de chauffage combiné avec la production ECS par une pompe à chaleur air/eau

La PAC est utilisée comme appoint pour la production d'ECS et comme générateur de chaleur pour le chauffage. Compte tenu des faibles besoins en énergie de chauffe des maisons, le régime de température dans le circuit de chauffage est à basse température, soit un régime 45 °C/35 °C (aller et retour).

Une priorité pour l'eau chaude sanitaire a été intégrée au contrôle de la pompe. Lorsqu'il y a un appel d'ECS, le système de chauffage se coupe si celui-ci était actif auparavant.

Deux variantes ont été envisagées pour ce système (Tableau 59) : avec et sans solaire thermique pour la production d'ECS.

| Variante | Chauffage | ECS | EnR |
|------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Variante 4 - V4 | | | |
| V4a | PAC et radiateurs | Ballon solaire et appoint par PAC | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V4b | PAC et radiateurs | Ballon solaire et appoint par PAC | Solaire photovoltaïque |

Tableau 59. Variantes : Système combiné

Résultat de simulation – V4a

Pompe à chaleur et radiateurs | Ballon solaire et appoint PAC | Solaire photovoltaïque et thermique

| Critère énergétique | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - production chauffage par PAC [kWh/an] | 1441 | 1501 | 1596 | 1678 |
| Surface de plancher chauffé (Ach) [m²] | 144.24 | 156.38 | 211 | 178.19 |
| Besoin annuel pour le chauffage [kWh/m².an] - critère pmp max. 15 kWh/m².an | -10 | -10 | -8 | -9 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 286 | 274 | 259 | 281 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Total des consommations [kWh/an] | 3599 | 3697 | 3783 | 3839 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4166 | 6961 | 4813 |
| Bilan annuel [kWh/an] | 898 | 1173 | 7945 | 2435 |
| Résultat performance énergétique - critère maison E+ VallEnergie | | | | |

| Critères environnemental et économique | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - Pompe à chaleur [kWh/an] | 1441 | 1501 | 1596 | 1678 |
| Vecteur énergétique pour le chauffage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique (RW) | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Consommation annuelle d'EP | 3603 | 3753 | 3990 | 4195 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire)[20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 724 | 754 | 802 | 843 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour le chauffage (€/an) | 297 | 309 | 329 | 346 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 286 | 274 | 259 | 281 |
| Vecteur énergétique pour l'ECS | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 286 | 274 | 259 | 281 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 286 | 274 | 259 | 281 |
| Consommation annuelle d'EP | 715 | 685 | 648 | 703 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire) [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 144 | 138 | 130 | 141 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |

| | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Coût annuel de l'énergie pour l'ECS (€/an) | 59 | 56 | 53 | 58 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Vecteur énergétique pour la ventilation | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 1279 | 1279 | 1279 | 1279 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 3762 | 3762 | 3762 | 3762 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire] [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 756 | 756 | 756 | 756 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour la ventilation [€/an] | 310 | 310 | 310 | 310 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Vecteur énergétique pour l'éclairage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 918 | 1043 | 1058 | 938 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire] [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 184 | 209 | 212 | 188 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'éclairage [€/an] | 76 | 86 | 87 | 77 |

| Bilan | | | | |
|--|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Total des consommations [kWh/an] | 3599 | 3697 | 3783 | 3839 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 3958 | 4166 | 6961 | 4813 |
| Bilan annuel [kWh/an] | 898 | 1173 | 7945 | 2435 |
| Émissions CO₂ évitées [kg/an] | 1561 | 1644 | 2746 | 1899 |
| Émissions CO₂ globales [kg/an] | -180 | -236 | -1596 | -489 |
| Coût annuel de l'énergie [€/an]* | -185 | -242 | -1637 | -502 |

**Le coût annuel est calculé d'après le prix d'achat moyen de l'électricité [24]. Ce coût est donc donné à titre informatif et ne reflète pas le coût réel en cas de revente du surplus de production électrique par les panneaux solaires photovoltaïques.*

Bilan annuel en énergie primaire (Figure 46) :

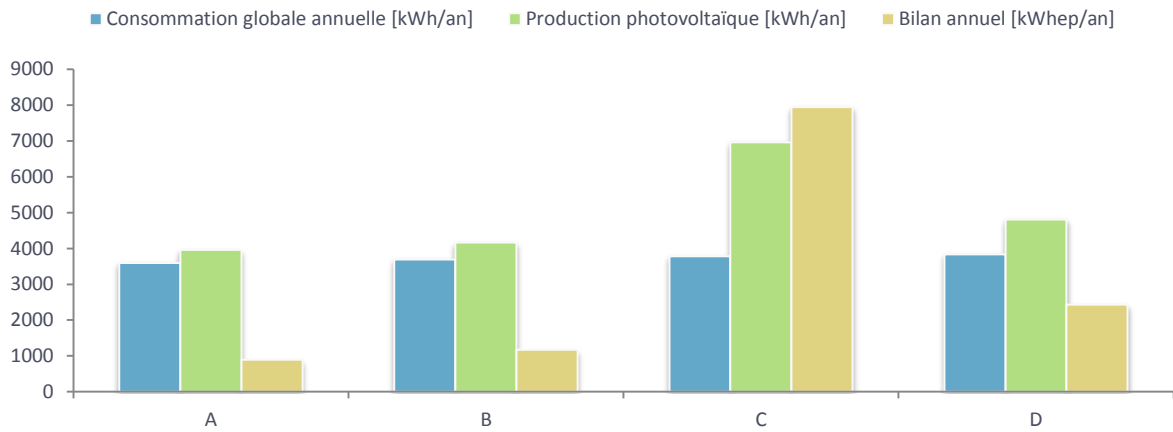


Figure 46. Bilan annuel en énergie primaire - V4a

Cette première variante pour le système combiné permet à tous les modèles de passer le critère E+ pour le bilan annuel en énergie primaire.

Résultat de simulation – V4b

Pompe à chaleur et radiateurs | Ballon solaire et appoint PAC | Solaire photovoltaïque

| Critère énergétique | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - production chauffage par PAC [kWh/an] | 1600 | 1792 | 1738 | 1912 |
| Surface de plancher chauffé (Ach) [m ²] | 144.24 | 156.38 | 211 | 178.19 |
| Besoin annuel pour le chauffage [kWh/m ² .an] - critère pmp max. 15 kWh/m ² .an | -11 | -11 | -8 | -11 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 481 | 292 | 473 | 282 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Total des consommations [kWh/an] | 3953 | 4006 | 4139 | 4074 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 4948 | 5208 | 7992 | 5673 |
| Bilan annuel [kWh/an] | 2488 | 3005 | 9633 | 3998 |
| Résultat performance énergétique - critère maison E+ VallEnergie | | | | |

| Critères environnemental et économique | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Consommation annuelle - Pompe à chaleur [kWh/an] | 1600 | 1792 | 1738 | 1912 |
| Vecteur énergétique pour le chauffage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique (RW) | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Consommation annuelle d'EP | 4000 | 4480 | 4345 | 4780 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire) [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 804 | 900 | 873 | 960 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour le chauffage (€/an) | 330 | 369 | 358 | 394 |
| Consommation annuelle - production d'ECS [kWh/an] | 481 | 292 | 473 | 282 |
| Vecteur énergétique pour l'ECS | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette | 481 | 292 | 473 | 282 |
| Consommation annuelle d'EF brute | 481 | 292 | 473 | 282 |
| Consommation annuelle d'EP | 1203 | 730 | 1183 | 705 |
| Facteur CO ₂ (kg CO ₂ /MWh primaire) [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ (kg/an) | 242 | 147 | 238 | 142 |
| Prix énergie (c€/kWh) - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |

| | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Coût annuel de l'énergie pour l'ECS (€/an) | 99 | 60 | 97 | 58 |
| Consommation annuelle pour la ventilation [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Vecteur énergétique pour la ventilation | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 1279 | 1279 | 1279 | 1279 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 1505 | 1505 | 1505 | 1505 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 3762 | 3762 | 3762 | 3762 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire] [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 756 | 756 | 756 | 756 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour la ventilation [€/an] | 310 | 310 | 310 | 310 |
| Consommation annuelle pour l'éclairage [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Vecteur énergétique pour l'éclairage | électricité | électricité | électricité | électricité |
| Facteur de conversion en Ep du vecteur énergétique | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Rendement du système | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Consommation annuelle d'EF nette [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EF brute [kWh/an] | 367 | 417 | 423 | 375 |
| Consommation annuelle d'EP [kWh/an] | 918 | 1043 | 1058 | 938 |
| Facteur CO ₂ [kg CO ₂ /MWh primaire] [20] | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 200.9 |
| Émissions CO₂ [kg/an] | 184 | 209 | 212 | 188 |
| Prix énergie [c€/kWh] - électricité[24] | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 |
| Coût annuel de l'énergie pour l'éclairage [€/an] | 76 | 86 | 87 | 77 |

| Bilan | | | | |
|--|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Total des consommations [kWh/an] | 3953 | 4006 | 4139 | 4074 |
| Production photovoltaïque [kWh/an] | 4948 | 5208 | 7992 | 5673 |
| Bilan annuel [kWh/an] | 2488 | 3005 | 9633 | 3998 |
| Émissions CO₂ évitées [kg/an] | 1952 | 2055 | 3153 | 2238 |
| Émissions CO₂ globales [kg/an] | -500 | -604 | -1935 | -803 |
| Coût annuel de l'énergie [€/an] | -512 | -619 | -1984 | -823 |

**Le coût annuel est calculé d'après le prix d'achat moyen de l'électricité [24]. Ce coût est donc donné à titre informatif et ne reflète pas le coût réel en cas de revente du surplus de production électrique par les panneaux solaires photovoltaïques.*

Bilan annuel en énergie primaire (Figure 47) :

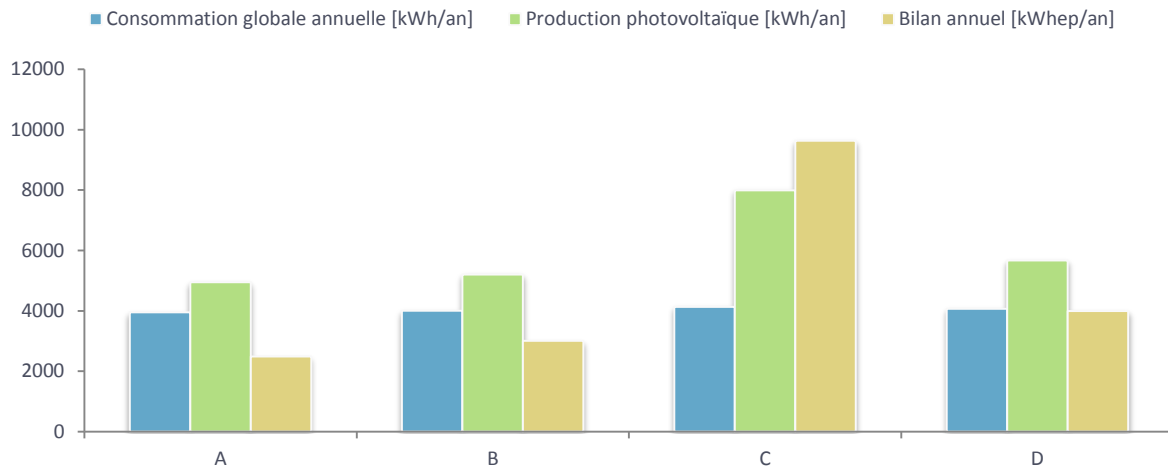


Figure 47. Bilan annuel en énergie primaire - V4b

La surface de toit libérée par le retrait des panneaux solaires thermiques laisse plus de place au photovoltaïque. Ceci se traduit par une production annuelle d'électricité plus grande et donc un bilan en énergie primaire plus favorable. Cependant, d'après les résultats, bien que la production photovoltaïque soit plus élevée dans la variante V4b, les consommations d'énergie pour le chauffage et la production d'ECS sont supérieures à celles obtenues avec un système comprenant des capteurs thermiques (variante V4a). Ces résultats illustrent bien la mise en garde du NREL. En effet, un bâtiment peut être considéré à énergie positive, tant que celui-ci est en mesure de compenser, voire de dépasser, sa consommation annuelle par une production locale d'énergie renouvelable. Ici ils s'agit du même cas de figure, les modèles sont identiques en tout point mais la source d'énergie renouvelable est différente. Dans le cas de la simulation V4a, les panneaux solaires thermiques permettent un apport de chaleur dans le ballon qui se traduit par diminution de la consommation électrique de la PAC. Le retrait de ces capteurs permet de produire plus d'électricité par les panneaux PV, mais cela se traduit aussi par une augmentation des pertes thermiques dans le ballon et en conséquence l'augmentation des consommations électriques de la PAC.

Le système V4a (avec panneaux solaires thermiques) est une plus proche illustration de la définition des maisons E+ du projet VallEnergie. Cependant, le bilan annuel calculé pour le critère E+ du projet VallEnergie ne prend pas en compte les consommations électriques liées aux appareils électroménagers. Dans ce cas, la variante V4b est une meilleure option, car la quantité d'énergie produite par les panneaux photovoltaïques serait suffisante pour pouvoir intégrer les consommations liées à l'électroménager dans le calcul du bilan annuel en EP. En moyenne, un ménage consomme 2500 kWh d'électricité pour les différents appareils électroménagers (calculs réalisés à partir de l'Info Fiche – énergie de l'IGBE [29]).

Synthèse

Bilan annuel en énergie primaire [kWh_{ep}/an] – comparaison des systèmes

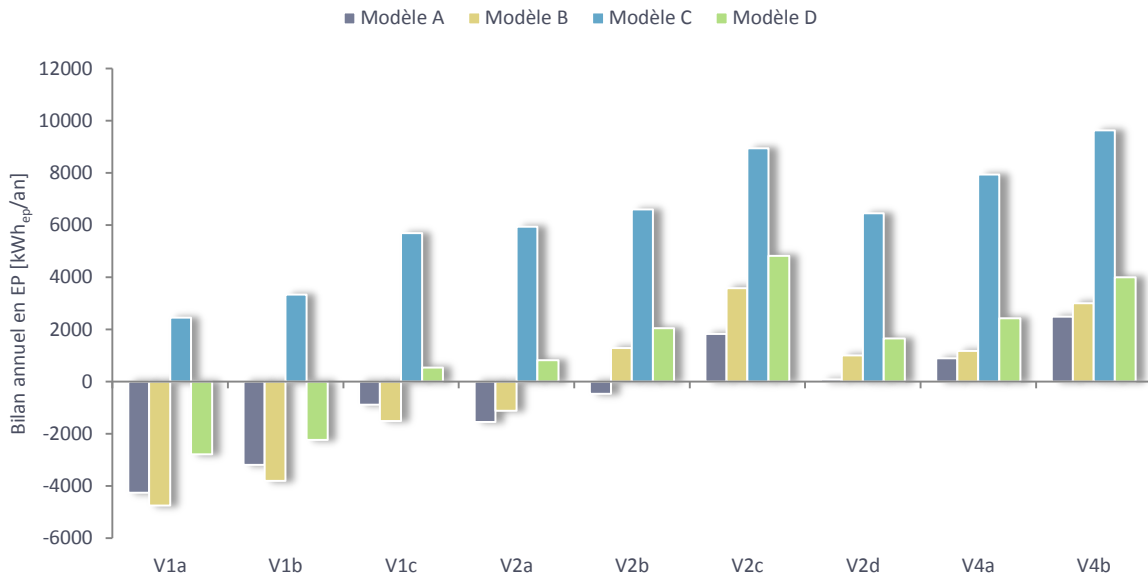


Figure 48. Bilan annuel en énergie primaire [kWh_{ep}/an] – synthèse





























| Variante | Chauffage | ECS | EnR |
|------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Variante 1 - V1 | | | |
| V1a | Électrique | Ballon électrique | Solaire photovoltaïque |
| V1b | Électrique | Ballon solaire | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V1c | Électrique | Ballon solaire et appoint par PAC | Solaire thermique et photovoltaïque |
| Variante 2 - V2 | | | |
| V2a | Poêle à pellets | Ballon électrique | Solaire photovoltaïque |
| V2b | Poêle à pellets | Ballon solaire | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V2c | Poêle à pellets | Ballon solaire et appoint électrique | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V2d | Poêle à pellets | Ballon solaire et appoint par PAC | Solaire thermique et photovoltaïque |
| Variante 3 - V3 | | | |
| V3 | Air chaud pulsé | - | - |
| Variante 4 - V4 | | | |
| V4a | PAC et radiateurs | Ballon solaire et appoint par PAC | Solaire thermique et photovoltaïque |
| V4b | PAC et radiateurs | Ballon solaire et appoint par PAC | Solaire photovoltaïque |

Le bilan annuel en énergie primaire est représenté graphiquement pour chacune des variantes de systèmes énergétiques étudiées et dans chacun des modèles de maisons (Figure 48). Un bilan positif est synonyme du respect du critère de la maison E+. Ceci indique une production annuelle d'énergie primaire supérieure à la consommation annuelle d'EP. Parmi les systèmes testés pour la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire, le chauffage électrique est à exclure. Celui-ci est pénalisé à cause du facteur de conversion en EP d'une valeur de 2.5 en Région wallonne. Le poêle à pellets est à l'inverse plus favorable (V2) pour la conversion en EP étant donné que le facteur appliqué pour le combustible bois en RW est de 1 (1kWh final bois consommé = 1 kWh primaire bois consommé). Cependant le confort évalué en degrés-heure de sous-chauffe pour ce système n'est pas suffisant (cf. page 101).

Le dernier système évalué par simulations est un système de pompe à chaleur combiné à un ballon solaire pour la production de chauffage et l'appoint d'ECS. Cette dernière présente de bons résultats à la fois en termes de bilan en énergie primaire, d'émission de CO₂ et de confort.

Bilan : critère énergétique maison E+ par système

D'après les résultats obtenus pour les différentes variantes de simulation, voici les résultats synthétisés dans le tableau suivant (Tableau 60), indiquant selon la légende le critère pour le bilan annuel en énergie primaire pour la maison E+.

| | Modèle A | Modèle B | Modèle C | Modèle D |
|-----|---|---|--|---|
| V1a |  |  |  |  |
| V1b |  |  |  |  |
| V1c |  |  |  |  |
| V2a |  |  |  |  |
| V2b |  |  |  |  |
| V2c |  |  |  |  |
| V2d |  |  |  |  |
| V3 | | | | |
| V4a |  |  |  |  |
| V4b |  |  |  |  |




-  Maison E+ : présente un bilan annuel en énergie primaire positif
-  Maison passive : présente un besoin net annuel pour le chauffage $\leq 15 \text{ kWh/an.m}^2$
-  Maison standard : dépasse les valeurs de besoin net annuel pour le chauffage du critère passif

Tableau 60. Critère énergétique maison E+ par système - synthèse

Bilan annuel des émissions de CO₂ [kg/an] – comparaison des systèmes

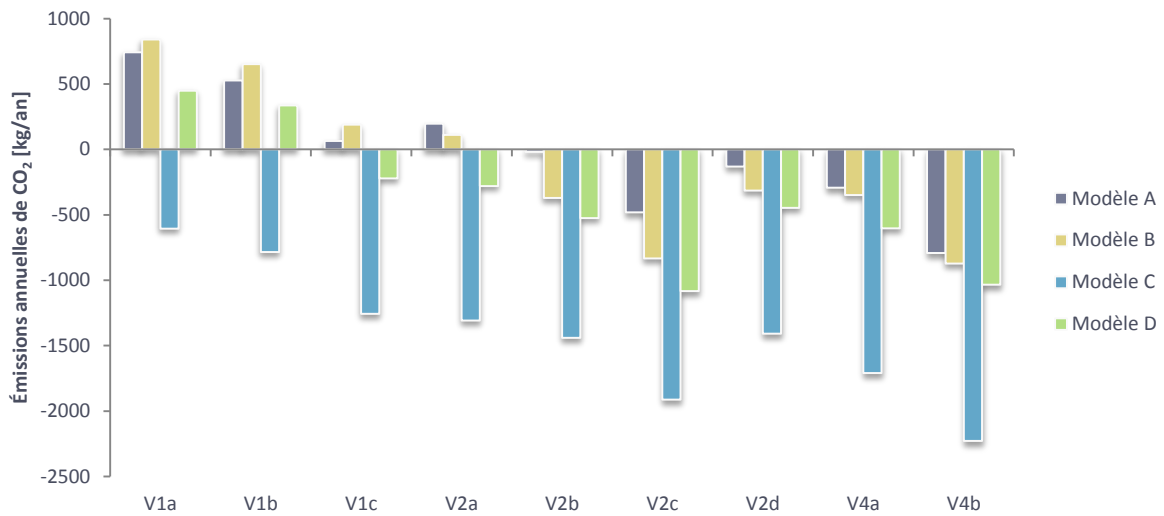


Figure 49. Bilan annuel des émissions de CO₂ [kg/an] – synthèse

Les maisons E+ sont caractérisées par une faible consommation d'énergie (Figure 49). Ceci se traduit également par de faibles rejets de GES, et notamment de CO₂. Un facteur de 200.9 kg de CO₂/ MWh d'EP [20] a été appliqué au bilan annuel en EP de chaque modèle. Ceci permet de donner une idée des émissions qui auraient été dégagées dans l'atmosphère dans le cas où l'électricité aurait été prélevée sur le réseau. Ici les panneaux photovoltaïques permettent la production d'une électricité « verte », neutre de toutes émissions de GES.

Dans le cas du poêle, les rejets de CO₂ dus à la combustion des pellets sont considérés comme nuls. D'après l'étude Bois-Énergie de la Région wallonne, il est possible de considérer le bois comme étant un combustible durable. la quantité de CO₂ émise lors de la combustion du bois correspond à celle prélevée par l'arbre lors de sa croissance. Dans ce cas l'étude précise qu'il est possible d'en déduire que « la balance en carbone engendrée par la filière bois-énergie est neutre car le cycle existant entre la photosynthèse de l'arbre et l'utilisation du bois comme combustible est parfaitement en équilibre et n'engendre pas l'émission de CO₂ additionnel »[30]. Les émissions de CO₂ de la variante V2 (poêle à pellets), sont dues aux consommations d'électricité pour l'éclairage, la ventilation et les auxiliaires.

Bilan annuel du coût de l'énergie [€/an] – comparaison des systèmes (Figure 50) :

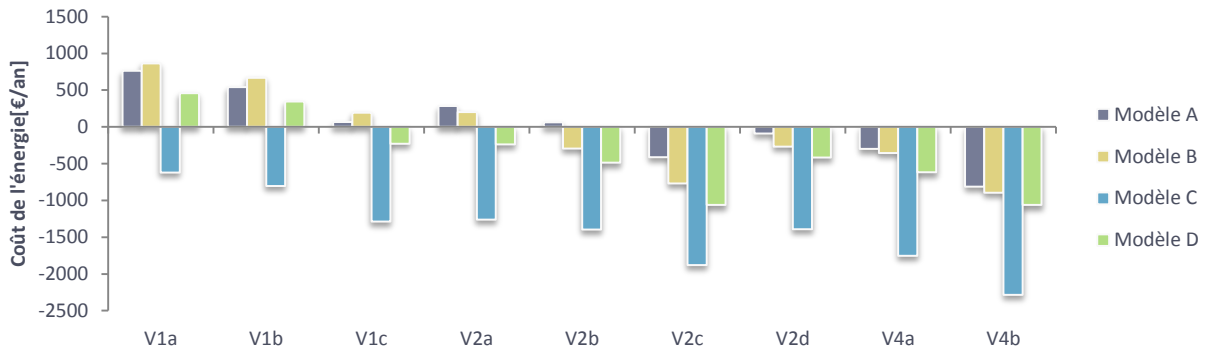


Figure 50. Bilan annuel du coût de l'énergie [€/an] – synthèse

Le coût annuel de l'énergie est calculé à partir des prix unitaires appliqués en RW pour les différents vecteurs énergétiques utilisés dans les variantes de simulation [24]. Dans le cas d'un bilan annuel positif, ce prix d'achat a été appliqué à l'énergie produite par les panneaux PV. Le mécanisme de soutien QUALIWATT, en vigueur en RW depuis le 1^{er} mars 2014 (www.energie.wallonie.be) prévoit une compensation entre les prélèvements et les injections d'électricité sur le réseau (notion du compteur « qui tourne à l'envers »). Cependant, il n'y a aucun rachat du surplus produit par les installations raccordées au réseau. Les résultats présentés ici ont donc pour objectif de mettre en évidence les économies, valorisées en euros, qui pourraient être réalisées par les maisons E+.

Analyse du confort : degrés-heures de sous-chauffe (<20 °C)

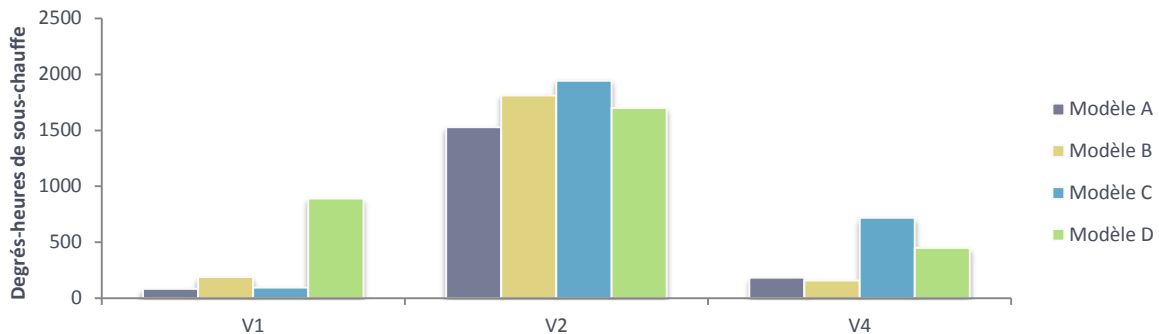


Figure 51. Evaluation de la sous-chauffe en fonction du système de chauffage

La sous-chauffe permet d'évaluer la capacité du système à maintenir la température de consigne dans la maison durant sa durée de fonctionnement. Celle-ci est exprimée en degrés-heures où la température est inférieure à 20 °C. Dans le cadre de l'étude, le poêle à pellets s'avère défavorable au maintien du confort dans les modèles (Figure 51). En effet, son temps de fonctionnement dans les modèles a été évalué à 3266 heures sur une année complète (8760 heures). En moyenne dans chaque modèle il y a 1700 heures où ce poêle n'est pas en mesure d'atteindre les 20 °C requis par la consigne. Ceci correspond à 53 % du temps de fonctionnement du système. D'après les résultats obtenus par simulation, ce système ne peut assurer un confort optimal dans les différents modèles.

Conclusions

À travers l'étude des projets de maisons E+, une série de simulations ont été réalisées afin d'établir une solution technique optimale qui permet d'atteindre la performance d'une maison à énergie positive. Cette maison doit au minimum répondre aux critères de la maison passive mais également être capable, dans des conditions climatiques normalisées (fichier météorologique du logiciel TRNSYS – climat de St Hubert), de produire localement plus d'énergie (d'origine renouvelable) que sa consommation annuelle. Les consommations pour le chauffage, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage et les auxiliaires, doivent être intégralement couvertes par la production d'énergie renouvelable locale de la maison, et ceci sur une base annuelle.

Pour parvenir à une telle performance, les maisons du projet VallEnergie doivent en premier lieu être conçues afin de limiter au maximum les pertes thermiques. C'est au niveau de l'enveloppe que les premières mesures doivent donc être prises pour conserver en hiver la chaleur dans l'habitation. D'après les simulations réalisées sur l'enveloppe, une isolation avec un faible coefficient de transmission thermique U (en W/m^2K) et une épaisseur suffisante (env. 30 cm) sont indispensables pour répondre au critère de besoin net pour le chauffage (max. 15 kWh/m².an) de la maison passive.

Par ailleurs, la maison doit assurer un confort en hiver mais également en été car il existe un risque de surchauffe lors de la saison estivale. Plusieurs options s'offrent dès lors pour lutter contre ce phénomène : l'ajout de protections solaires (au niveau des vitrages les plus à risque) et/ou l'utilisation d'une ventilation nocturne (ouverture des fenêtres la nuit lorsque cela est possible et que la température extérieure est suffisamment fraîche). Dans le cas des maisons du projet VallEnergie, une combinaison de ces deux mesures permet à la fois de lutter efficacement contre la surchauffe en été mais également de limiter le coût lié à l'installation des protections solaires en intégrant celles-ci uniquement sur les vitrages les plus fortement exposés au soleil.

Les simulations visaient également à étudier des systèmes de production d'ECS et de chauffage. Quatre moyens de production d'ECS ont été modélisés et simulés. Pour le chauffage, trois systèmes ont été étudiés. Enfin, pour la production d'électricité photovoltaïque, quatre modèles de panneaux PV ont été comparés.

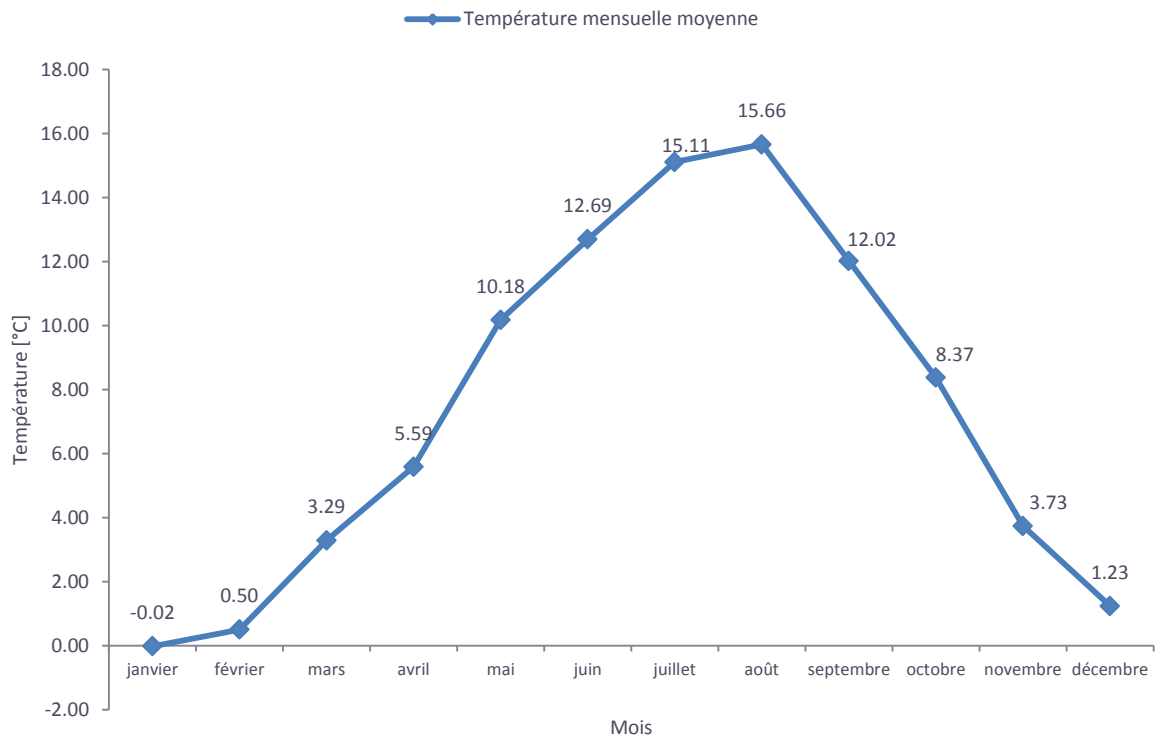
À partir de ces différents éléments, des variantes de simulations ont été imaginées afin de combiner ces systèmes (ECS, chauffage et PV), et d'évaluer la meilleure solution qui permet d'atteindre le critère de maison E+ pour les quatre maisons du projet.

Les résultats ont permis de mettre en évidence un type de maison permettant de répondre aux différents critères du cahier des charges du projet et de s'inscrire dans les objectifs de l'Union Européenne pour l'horizon 2020. La solution retenue est un système combiné de chauffage et production d'ECS via une pompe à chaleur air/eau. Des panneaux solaires thermiques (pour chauffer « gratuitement » l'eau du ballon) et des panneaux solaires photovoltaïques sont intégrés dans le système pour compenser la consommation en électricité de la PAC, des auxiliaires, de la ventilation et de l'éclairage. Cette solution permet à toutes les maisons de répondre au critère de maisons E+. Le chauffage par la PAC et l'émission de chaleur par les radiateurs sont suffisants pour maintenir le confort dans toutes les zones des maisons. Le coût annuel de la consommation d'énergie peut être considéré comme étant nul compte tenu du fait que les maisons sont en mesure de compenser cette consommation par leur production. Cependant, cette conclusion n'est valable que sur la base d'un bilan annuel. Si la consommation et la production sont comparées heure par heure il est possible qu'à certains moments de l'année la production d'énergie renouvelable soit insuffisante pour couvrir la consommation. De ce fait le bilan sera négatif et les maisons ne répondront pas au critère de maisons E+. Cependant, le bilan des maisons du projet est défini pour être calculé sur une base annuelle. Par conséquent, les résultats de simulation ont permis de démontrer que les maisons sont en mesure de répondre au critère de maisons E+. Pour que ces maisons aient un bilan horaire positif, il faudrait alors envisager un stockage de l'électricité

produite par les panneaux photovoltaïques afin d'augmenter la performance énergétique des maisons et de les rendre totalement autonomes. Il s'agit dès lors d'une nouvelle perspective pour de futurs projets.

Annexes

Annexe I. Température mensuelle moyenne - Saint-Hubert (Belgique)



Annexe II. Résultats : Impact de la consigne de température sur la consommation d'énergie annuelle pour le chauffage

| Tconsigne (°C) / Consommation (kWh/an) | A | B | C | D |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 16/20 | 1696 kWh | 2102 kWh | 1998 kWh | 1825 kWh |
| 16/19 | 1414 kWh | 1666 kWh | 1633 kWh | 1484 kWh |
| 16/21 | 2001 kWh | 2426 kWh | 2355 kWh | 2223 kWh |
| % variation 16/20 -> 16/19 | -17 % | -21 % | -18 % | -19 % |
| % variation 16/20 -> 16/21 | +18 % | +15 % | +18 % | +22 % |

Annexe III. Résultats : Impact des gains internes sur la consommation d'énergie annuelle pour le chauffage

| | A | B | C | D |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Avec gains | 1696 kWh | 2102 kWh | 1998 kWh | 1825 kWh |
| Sans gain | 3077 kWh | 3617 kWh | 3572 kWh | 3107 kWh |
| % variation | +81 % | +72 % | +79 % | +70 % |

Références

- [1] European commission, « DIRECTIVE 2010/31/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments (refonte) », p. 13-35, 2010.
- [2] European Commission, « European Commission. » [En ligne]. Disponible sur: <http://ec.europa.eu>.
- [3] European commission, « Directive relative à l'efficacité énergétique », p. 1-56, 2012.
- [4] ECOFYSGermany GmbH et Danish Building Research Institute (SBI), « Principles For nearly Zero-energy Buildings », 2011.
- [5] S. Pless et P. Torcellini, « Net-Zero Energy Buildings : A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options », *Contract*, n° June, p. 1-14, 2010.
- [6] J. Kurnitski, T. Buso, S. P. Corgnati, A. Derjanecz, et A. Litiu, « nZEB definitions in Europe », *REHVA Eur. HVAC J.*, vol. 51, n° 2, p. 6-9, 2014.
- [7] Plateforme Maison Passive a.s.b.l -pmp et PassiefHuis Platform v.z.w PHP, « Vade-mecum résidentiel - Guide d'aide à la conception de bâtiments à haute performance énergétique », 2013.
- [8] Service Public de Wallonie (SPW) - DGO4, « Plan d'action NZEB », 2010.
- [9] Université De Liège, « CAHIER SPÉCIAL DES CHARGES DU MARCHÉ PUBLIC DE SERVICES ayant pour objet l' étude de 2 maisons à énergie positive dans le cadre du projet VallEnergie », p. 1-22, 2014.
- [10] Plateforme Maison Passive a.s.b.l -pmp, « <http://www.maisonpassive.be> », 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.maisonpassive.be>.
- [11] Centre Scientifique et Technique de la Construction - CSTC, « European standard EN 13363-1:2007, Solar protection devices combined with glazing - Calculation of solar and light transmittance Part.1 : Simplified method », 2007.
- [12] Fédération de l'Industrie du Verre, « Un regard éclairé sur des logements de qualité à consommation d'énergie quasi nulle », p. 7, 2014.
- [13] Bruxelles Environnement - IBGE, « LES EXIGENCES PEB à partir de 2015 », *Info Fiches*, p. 1-7, 2015.
- [14] S. Firlåg et S. Murray, « Impacts of airflows, internal heat and moisture gains on accuracy of modeling energy consumption and indoor parameters in passive building », *Energy Build.*, vol. 64, p. 372-383, 2013.
- [15] International Organization for Standardization, « ISO 7730:2006 Ergonomics of the thermal environment », 2006.
- [16] J.-M. Hauglustaine et F. Simon, « La ventilation et l'énergie - Guide pratique pour les architectes », p. 14, 2006.
- [17] Arrêté du Gouvernement wallon du 10 mai 2012, « Annexe V - DISPOSITIFS DE VENTILATION DANS LES BATIMENTS RESIDENTIELS. »
- [18] Chambre des métiers Luxembourg, « Performance énergétique des bâtiments », *Les Avis la Chamb. des métiers*, p. 57, 2014.

- [19] EPBD, « Base de données PEB - VENTILATEURS ET GROUPE DE VENTILATION - Données de produit reconnues », 2015.
- [20] Service Public de Wallonie (SPW), « Arrêté du Gouvernement wallon du 27 février 2014 », 2014.
- [21] CSTC, « FICHES PEB & METIERS LES PROTECTIONS SOLAIRES (Draft) », p. 1-7, 2010.
- [22] R. Heimrath et M. Haller, « The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32, Report A2 of Subtask A », 2007.
- [23] Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie (DGO4) et Centre interdisciplinaire de formation de formateurs de l'Université de Liège (CIFIUL), « Le guide PEB - Réglementation à partir du 1er mai 2015 », 2015.
- [24] Apere ASBL, « Prix d'achat de l'énergie par les ménages », *renouvelle - l'actualité l'énergie durable*, vol. 65, p. 1-12, 2014.
- [25] « Rapport annuel de l'Institut Luxembourgeois de Régulation - Organisation du marché de l'électricité et du gaz naturel ; analyse des prix de la fourniture intégrée en électricité et en gaz naturel au Luxembourg pour les clients résidentiels . », vol. 54, p. 1-26, 2013.
- [26] L. Georges et V. Novakovic, « On the integration of wood stove for the space-heating og Passive Houses : Assessment using dynamic simulation », n° September, p. 157-164, 2012.
- [27] P. Wierusz-Kowalski, « Formation Bâtiment durable : passif et (très) basse énergie », *Inst. Bruxellois pour la Gest. l'Environnement*, 2015.
- [28] C.-A. Roulet, *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*, Première é. Lausanne, 2004.
- [29] Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE), « Quelle est la consommation moyenne des électroménagers ? », p. 2, 2009.
- [30] Valorisation de la Biomasse ASBL (ValBiom), « La filière bois-énergie », 2004.