

Autoconsommation et stockage thermique de l'énergie solaire dans une habitation résidentielle

Yassine MASMOUDI^(1,2), Imane IHSANE⁽²⁾, Laurence MIEGEVILLE⁽¹⁾, Patrick GUERIN⁽¹⁾

⁽¹⁾Nantes Université, Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique, IREENA, UR 4642
F-44600 Saint-Nazaire, France

⁽²⁾CESI LINEACT, Campus Saint-Nazaire, France

RESUME - L'objectif de ce travail est de tester des méthodes de gestion et de stockage des énergies renouvelables produites au niveau d'une habitation individuelle. Un simulateur, fondé sur les modèles des équipements d'une habitation et des sources d'énergies renouvelables solaire qu'elle intègre, a été conçu à des fins de développement d'algorithmes d'optimisation pour l'amélioration de la gestion énergétique. Le choix d'un système multi-sources, combinant une installation solaire thermique (ST) et une installation photovoltaïque (PV), a permis de couvrir 34 % des besoins des charges électrodomestiques (CED) et 75,8 % des besoins en eau chaude sanitaire, tout en démontrant une réduction significative de la dépendance au réseau électrique de 51,6%. Toutefois, l'analyse des résultats en l'absence d'une gestion optimisée témoigne des effets contraires à ceux escomptés en termes de performances de l'installation, ce qui redouble l'intérêt d'une optimisation de la gestion d'énergie.

Mots-clés— Photovoltaïque, stockage, gestion, énergies renouvelables, secteur résidentiel, autoconsommation.

1. INTRODUCTION

L'intermittence des énergies renouvelables impose la nécessité de mettre en œuvre des stratégies avancées de gestion et des technologies efficaces de stockage afin d'assurer leur intégration optimale et la stabilité des systèmes énergétiques. Actuellement, les options disponibles pour stocker l'énergie électrique restent limitées, en particulier pour les applications domestiques, où le choix se révèle encore plus restreint, compte tenu des coûts financiers. L'absence de gestion efficace de la production d'énergie renouvelable entraîne des pertes significatives, telles qu'une énergie non valorisée ou une injection sur le réseau électrique générant des revenus faibles, voire nuls, sans compter un impact négatif sur le taux d'autoconsommation. La maximisation de l'autoconsommation a précisément été la finalité des travaux menés par [1] et [2]. La diversification des sources d'énergies renouvelables, visant à garantir une production stable et fiable, constitue une autre alternative pour couvrir les besoins énergétiques en énergies renouvelables. Ce choix a été abordé par [3] et [4].

Si le stockage de l'énergie électrique paraît difficile dans l'habitat résidentiel, ce dernier dispose naturellement du stockage thermique (enceinte du bâtiment, ballon d'eau chaude sanitaire ou de chauffage) qu'il peut être judicieux d'exploiter [5]. Dans la littérature, des travaux expérimentaux ont été réalisés par [6] pour stocker l'énergie provenant de différents systèmes de production de chaleur renouvelable, comprenant des panneaux thermiques, des capteurs photovoltaïques et des

panneaux photovoltaïque/thermique (PVT). Cependant, l'absence de travaux traitant d'une habitation individuelle intégrant des systèmes multi-sources d'énergie avec un protocole de gestion et exploitant la valorisation de l'inertie thermique de l'eau chaude comme moyen de stockage, nous a incités à explorer cette problématique.

La mise en application des présents travaux a été réalisée sur une habitation fictive de type maison individuelle, d'une surface habitable de 150m² et située dans la région nantaise. Cette maison abrite deux parents en activité et deux enfants. Le foyer dispose d'équipements électroménagers appelés ci-après charges électrodomestiques (CED) répartis en équipements multimédia, petit et gros électroménagers, éclairage... La consommation d'électricité liée à la production d'eau chaude sanitaire (ECS) est assurée par une résistance immergée de 3 kW située dans le réservoir d'eau chaude de 300 litres selon les recommandations de l'ADEME[7], lequel est alimenté en heures creuses. Cette configuration est illustrée en figure 1 et servira de référence pour les autres cas d'études envisagés.

L'analyse de cet habitat couvre une année complète, même si les résultats seront présentés sur deux périodes d'une semaine, l'une en été et l'autre en hiver, afin d'évaluer les variations saisonnières des performances énergétiques.

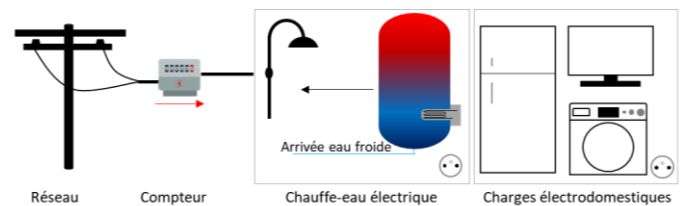


Fig. 1. Configuration 1 : Charges assurées par le réseau électrique

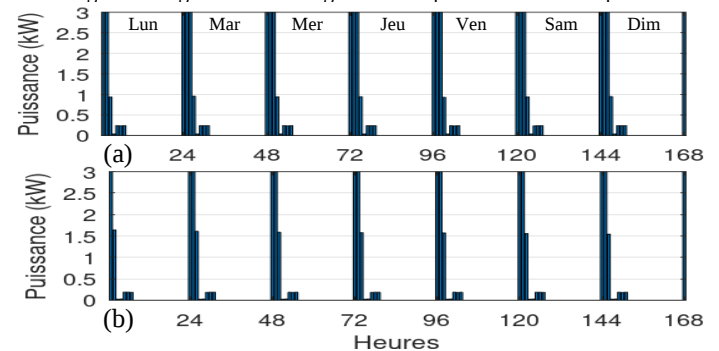


Fig. 2. Profils horaires de la consommation d'énergie électrique pour les besoins en ECS durant une semaine d'hiver (a) et une semaine d'été (b)

2. METHODOLOGIE

Dans le cadre général des travaux menés sur la gestion des flux de puissance dans les réseaux à faible puissance de court-circuit, nous avons développé un simulateur dédié à l'habitat résidentiel. Les principaux équipements énergétiques (électrique et thermique) d'une habitation ont ainsi fait l'objet d'une modélisation de leurs flux de puissance. Ces modèles ont été développés selon une approche orientée objet sous Octave, constituant ainsi une bibliothèque de composants comprenant : des panneaux solaires photovoltaïques et thermiques, un ballon de stockage d'eau chaude, des batteries électriques, des onduleurs, des charges électrodomestiques et une enceinte de bâtiment.

Les finalités de ce simulateur sont multiples et concernent autant le dimensionnement des installations, que les tests de configurations d'équipements, ou encore l'expérimentation de nouveaux algorithmes de gestion d'énergie. Le présent article s'intéresse prioritairement à la présentation et l'analyse des résultats de simulation pour quatre configurations de l'habitation décrite ci-avant et connectée au réseau, dans un contexte de valorisation de l'autoconsommation locale :

- Configuration 1 : habitation « tout électrique » où aucune énergie renouvelable ni système de gestion d'énergie déployé »
- Configuration 2 : recours à une installation ST pour l'ECS
- Configuration 3 : intégration d'une installation PV
- Configuration 4 : mise en place d'une installation ST+PV avec intégration d'un système de gestion d'énergie.

Une étude comparative a été réalisée afin de déterminer la configuration permettant d'atteindre les objectifs précités et d'identifier les différentes pistes d'amélioration possibles.

2.1. Configuration 2

Le système solaire thermique est composé de panneaux couvrant une surface totale de 5,52 m² (l'ADEME [7] recommande entre 3,5 à 6,5 m²). Ces panneaux, orientés plein sud et inclinés de 38° par rapport à l'horizontale, alimentent le ballon d'eau chaude sanitaire.

Le ballon d'eau chaude est chauffé selon deux modes de fonctionnement possibles :

- Pendant les heures creuses, la résistance immergée est activée et alimentée par l'électricité du réseau afin de chauffer l'eau du ballon jusqu'à atteindre la température de consigne maximale en mode électrique de 65°C.
- Pendant la journée, l'installation solaire thermique assure le chauffage du ballon d'eau chaude, autorisant une température maximale en mode thermique de 85°C.

2.2. Configuration 3

L'installation solaire PV de 15m² correspondant à 3,2 kWc, soit 3kVA max en tenant compte des onduleurs (seuil de puissance autorisé pour l'autoconsommation en monophasé). L'installation PV dispose d'une inclinaison et d'une orientation identiques à celles des panneaux thermiques. L'énergie électrique disponible est prioritairement destinée à couvrir les besoins électriques des appareils électroménagers. Lorsque la production excède ces besoins, le surplus sert à alimenter la résistance du ballon d'ECS. Comme dans la configuration 2, en mode électrique, la température maximale du ballon est fixée à 65°C. Dans les cas où un excédent persiste il est réinjecté sur le réseau de distribution. Durant les heures creuses, le chauffage

d'appoint via la résistance électrique alimentée par le réseau prend le relais si nécessaire.

2.3. Configuration 4

L'association thermique et photovoltaïque sert à évaluer l'effet de l'intégration des deux sources d'énergies renouvelables, en utilisant les caractéristiques des panneaux, les surfaces et les dispositions identiques aux cas de chaque installation prise séparément.

En cas de besoin, un chauffage d'appoint de l'ECS est assuré par l'électricité du réseau en heures creuses. Pendant la journée, la chaleur générée par les panneaux solaires thermiques est utilisée en priorité. Les panneaux photovoltaïques, quant à eux, alimentent en premier les besoins des charges électrodomestiques. L'excédent de production est ensuite utilisé pour le chauffage du ballon d'ECS et, en cas de surplus, il est réinjecté dans le réseau. L'organigramme décrivant le mode de fonctionnement de cette configuration est présenté en figure 4. Les schémas des trois configurations sont présentés en figure 3.

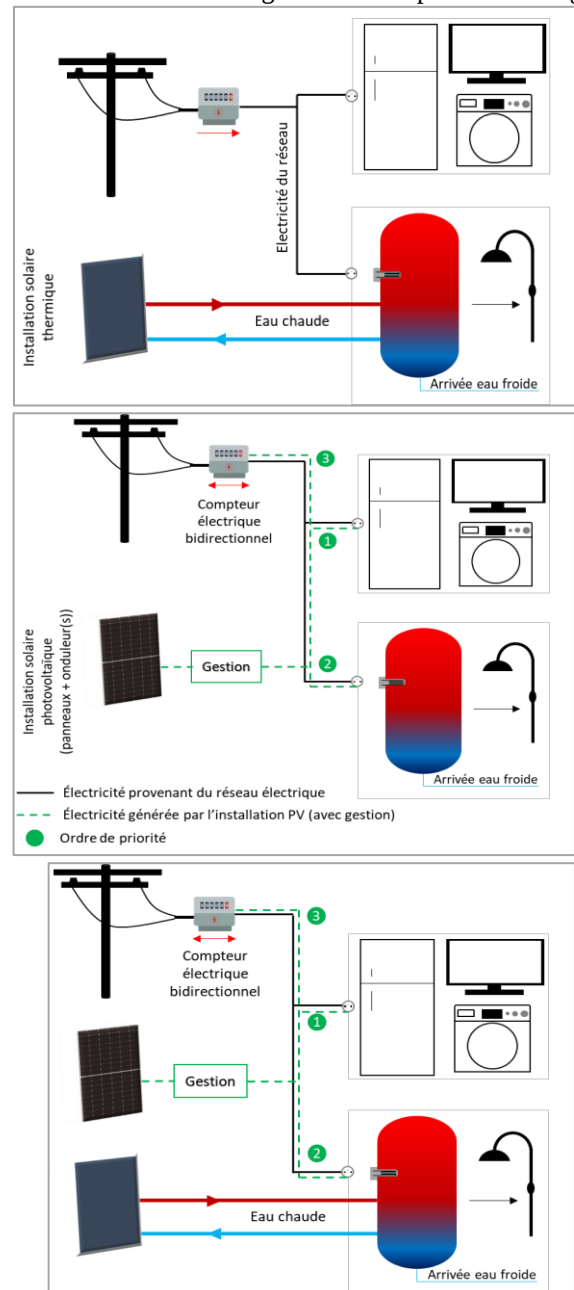


Fig. 3. (de haut en bas) Schémas des configurations 2, 3 et 4

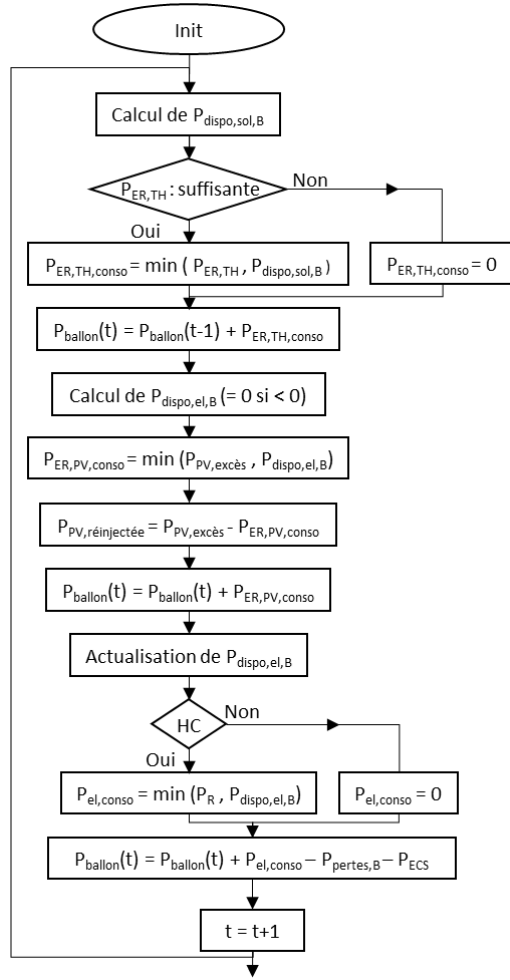


Fig. 4. Organigramme de la gestion d'énergie pour la configuration 4

Tableau 1. Définitions

$P_{dispo,sol,B}$	Puissance disponible au ballon, capable d'absorber l'énergie fournie par le chauffage solaire thermique.
$P_{ER,TH}$	Puissance thermique renouvelable délivrée par les panneaux solaires thermiques. Elle est décrite comme suffisante si la température du fluide à la sortie des panneaux est supérieure à celle du ballon.
$P_{ER,TH,conso}$	Puissance thermique renouvelable valorisée : injectée dans le ballon. (Chauffage possible du ballon jusqu'à 85°C)
$P_{dispo,el,B}$	Puissance disponible au ballon, absorbant l'énergie du chauffage d'appoint en heures creuses ou de l'électricité photovoltaïque. Cette puissance est calculée après un éventuel chauffage par l'installation thermique. (Chauffage possible du ballon jusqu'à 65°C)
HC	Heures creuses.
$P_{PV,excès}$	Puissance photovoltaïque excédentaire après alimentation des charges électrodomestiques.
$P_{ER,PV,conso}$	Puissance photovoltaïque renouvelable valorisée au niveau du ballon d'eau chaude.
$P_{PV,réinjectée}$	Puissance photovoltaïque réinjectée sur le réseau.
P_R	Puissance de la résistance immergée.
$P_{el,conso}$	Puissance électrique consommée par la résistance du ballon.
P_{ballon}	Puissance thermique au niveau du ballon d'eau chaude.
$P_{pertes,B}$	Pertes thermiques à travers les parois du ballon.
P_{ECS}	Puissance thermique consommée pour les besoins en eau chaude sanitaire.

La quantité d'énergie produite dépend principalement des données météorologiques. La température extérieure et le rayonnement global sur un plan incliné de 38° durant les deux semaines faisant l'objet de l'étude sont représentés en figures 5 et 6 respectivement.

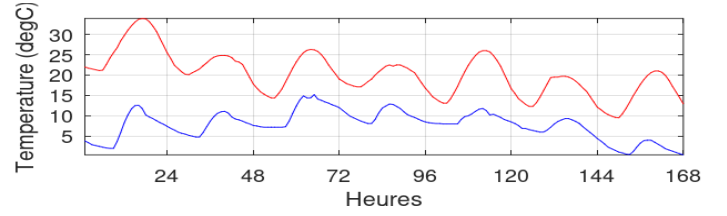


Fig. 5. Profils horaires de la température extérieure pendant une semaine d'hiver (bleu) et une semaine d'été (rouge)

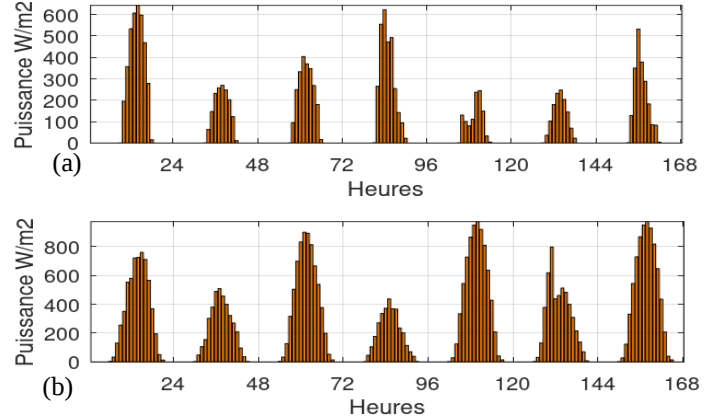


Fig. 6. Profils horaires du rayonnement global sur le plan incliné des capteurs pendant une semaine d'hiver (a) et une semaine d'été (b)

3. RESULTATS ET ANALYSES

3.1. Indicateurs

Afin de compléter la caractérisation des configurations et en évaluer leurs performances plusieurs indicateurs ont été utilisés.

3.1.1. Taux d'autoconsommation (TAC)

Il s'agit du rapport entre l'énergie renouvelable produite localement et consommée sur place et l'énergie totale produite par cette installation. Un taux d'autoconsommation élevé indique une meilleure exploitation locale de l'énergie produite. Dans le cas d'une installation photovoltaïque, cet indicateur permet d'évaluer la part de l'électricité générée et consommée sans être injectée sur le réseau. En ce qui concerne l'énergie solaire thermique, ce taux permet d'évaluer la part de chaleur produite par les capteurs solaires thermiques et effectivement transférée au ballon d'eau chaude, sans être dissipée sous forme de pertes thermiques au niveau des capteurs. Ces pertes peuvent survenir lorsque la puissance thermique fournie est insuffisante pour chauffer le ballon, notamment en raison d'un faible rayonnement solaire ou d'une température du ballon déjà élevée, voire maximale autorisée.

$$TAC (\%) = \left(\frac{\text{énergie renouvelable consommée}}{\text{énergie renouvelable totale produite}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

3.1.2. Taux de couverture en énergie renouvelable (TCR)

Il désigne le pourcentage de la demande énergétique totale d'un système de charges qui est satisfait par des sources d'énergies renouvelables. On le nomme également l'apport des énergies renouvelables aux besoins du système de charges. Un taux de couverture élevé indique une dépendance réduite au réseau électrique et une meilleure utilisation des énergies renouvelables.

$$TCR (\%) = \left(\frac{\text{énergie renouvelable consommée}}{\text{demande totale d'énergie}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

3.1.3. Efficacité de l'installation d'énergie renouvelable (η)

Elle fait référence à la capacité d'un système à convertir l'énergie initialement disponible (solaire dans cette étude) en une forme d'énergie utile consommée. L'efficacité dépend, entre autres, de la qualité des équipements et de l'optimisation du dimensionnement du système ainsi que de la gestion de la production et de la consommation. Dans cette étude, cet indicateur nous permet de comparer les performances des différentes technologies de production d'énergie à partir de l'énergie solaire.

$$\eta (\%) = \left(\frac{\text{énergie utile produite}}{\text{énergie disponible initiale}} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

3.2. Configuration 1

Les résultats de simulation de la première configuration serviront de référence. Ils montrent que l'appoint électrique en heures creuses permet le maintien de la température du ballon autour de 65°C. En dehors de ces périodes la consommation en eau chaude engendre une baisse de la température du ballon (voir figure 7). La température minimale enregistrée est de 35,7°C. La demande en eau chaude l'été est moins importante que celle durant l'hiver, par conséquent le ballon conserve une température plus élevée par rapport à la période hivernale.

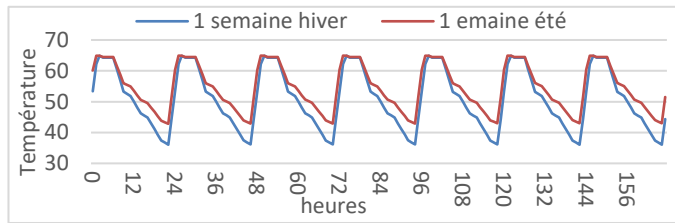


Fig. 7. Evolution horaire de la température de l'eau dans le ballon

3.3. Configuration 2

L'intégration d'une installation solaire thermique permet, lorsque l'ensoleillement est suffisant, d'élever la température du ballon. Ainsi le recours à l'appoint électrique durant les heures creuses nocturnes est limité comme le montre la figure 10. La contribution de cette chaleur d'origine renouvelable est forcément plus marquée en été, où lors des journées fortement ensoleillées, un excès de chaleur renouvelable demeure généralement non valorisée en fin de journée telles que le décrivent les figures 9 et 10.

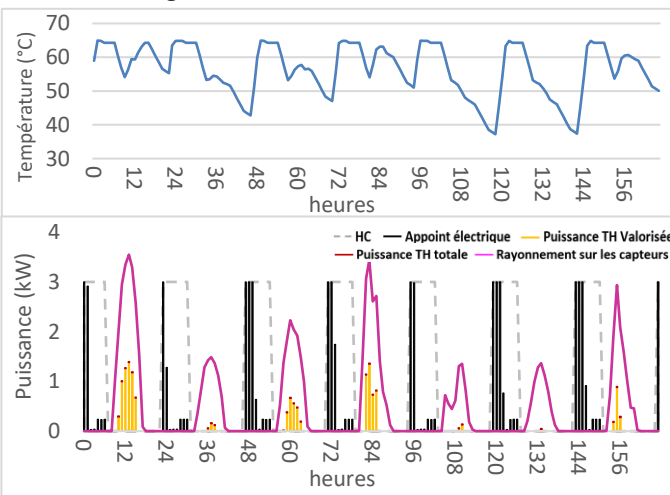


Fig. 8. Profils horaires de la température du ballon (haut) et les flux de puissances entrants dans le ballon (bas) durant une semaine d'hiver

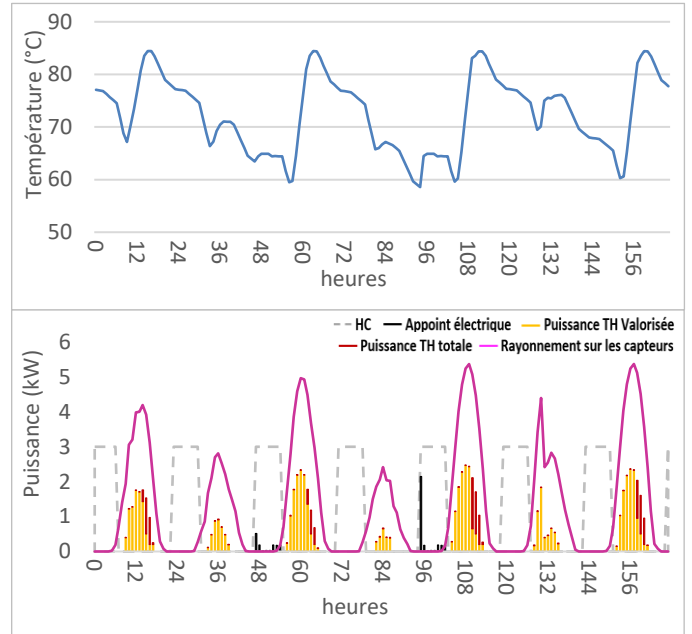


Fig. 9. Profils horaires de la température du ballon (haut) et les flux de puissances entrants dans le ballon (bas) durant une semaine d'été

L'analyse des résultats de simulation de cette configuration en période hivernale montre que toute la chaleur valorisable fournie par l'installation solaire est consommée. Néanmoins, la température du ballon n'a pas dépassé 65°C alors qu'elle pourrait atteindre 85°C. De plus, toute l'énergie solaire n'est pas exploitée soit en raison de la baisse du rendement du capteur lorsque la température d'entrée du fluide est élevée, soit parce que le rayonnement est insuffisant et ne permet pas d'élever la température du fluide au-dessus de la température du ballon.

3.4. Configuration 3

Après avoir couvert les besoins des charges électrodomestiques, l'excédent d'électricité d'origine photovoltaïque, est utilisé pour chauffer le ballon ECS. Pendant les heures creuses, l'appoint électrique du réseau intervient éventuellement pour réchauffer l'eau jusqu'à 65°C. Les résultats de simulations sont présentés en figures 11 et 12.

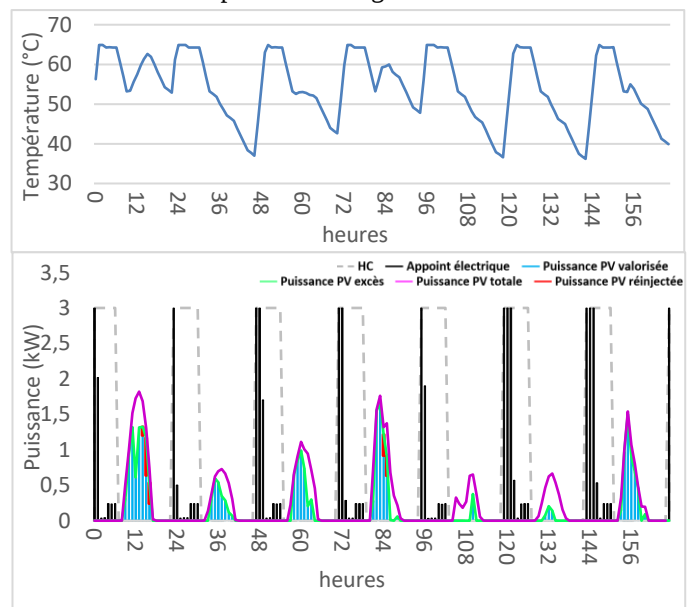


Fig. 10. Profils horaires de la température du ballon (haut) et les flux de puissances entrants dans le ballon (bas) durant une semaine d'hiver

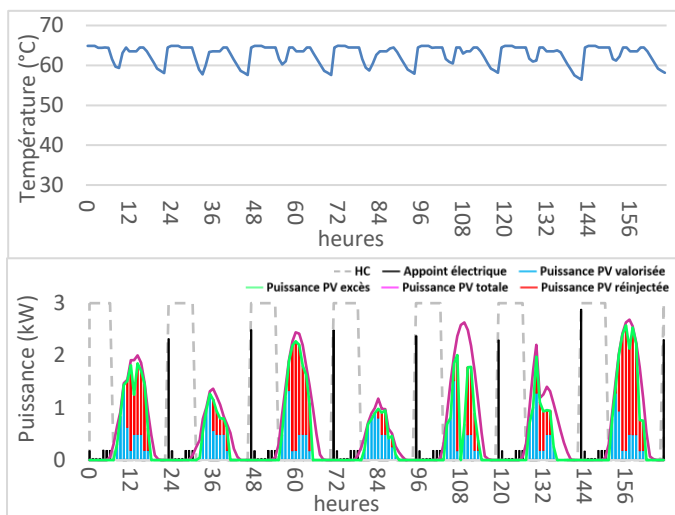


Fig. 11. Profils horaires de la température du ballon (haut) et les flux de puissances entrants dans le ballon (bas) durant une semaine d'été

Les résultats de simulation de cette configuration montre que l'électricité d'origine PV permet de chauffer le ballon lors des journées ensoleillées. Le recours à l'appoint électrique diminue légèrement en hiver par rapport à la configuration 1 voire la configuration 2. Cela pourrait démontrer une meilleure efficacité des panneaux PV par rapport au ST. En effet, en hiver, la contribution de l'énergie solaire photovoltaïque est plus marquée que celle du solaire thermique, car le photovoltaïque peut produire de l'électricité à partir du rayonnement diffus, tandis que les capteurs thermiques sont davantage sensibles au rayonnement direct. De plus, la température ambiante basse favorise le fonctionnement des installations photovoltaïques, tandis qu'elle a un impact négatif sur les systèmes thermiques en raison de l'augmentation des pertes thermiques.

Même si l'appoint électrique nocturne est plus faible en été, celui-ci est toujours présent alors qu'il pouvait disparaître avec les capteurs thermiques. Un meilleur rendement de ces derniers peut en être l'explication mais le choix de limiter la température à 65°C pourrait aussi intervenir. Durant la période hivernale, une faible quantité d'électricité renouvelable est injectée sur le réseau tandis qu'en période estivale, cet excédent est beaucoup plus important. Le besoin des charges électrodomestiques est également mieux couvert durant l'été.

3.5. Configuration 4

L'équipement de cette habitation avec une installation photovoltaïque et une installation solaire thermique montre que ces deux sources de chaleur renouvelable contribuent à maintenir une température plus élevée du ballon. Cependant la quantité de chaleur produite et fournie par l'installation thermique diminue par rapport à la configuration 2, étant donné que l'installation photovoltaïque contribue également au chauffage du ballon, réduisant ainsi les écarts de températures favorables au transfert thermique. En effet, La contribution thermique du panneau solaire diminue avec l'élévation de la température du ballon de stockage, traduisant une relation inverse entre ces deux grandeurs. Tels qu'en attestent les figures 13 et 14, la réinjection sur le réseau de l'installation photovoltaïque a également augmenté par rapport à la configuration 3, en raison de la réduction de l'autoconsommation pour le chauffage du ballon.

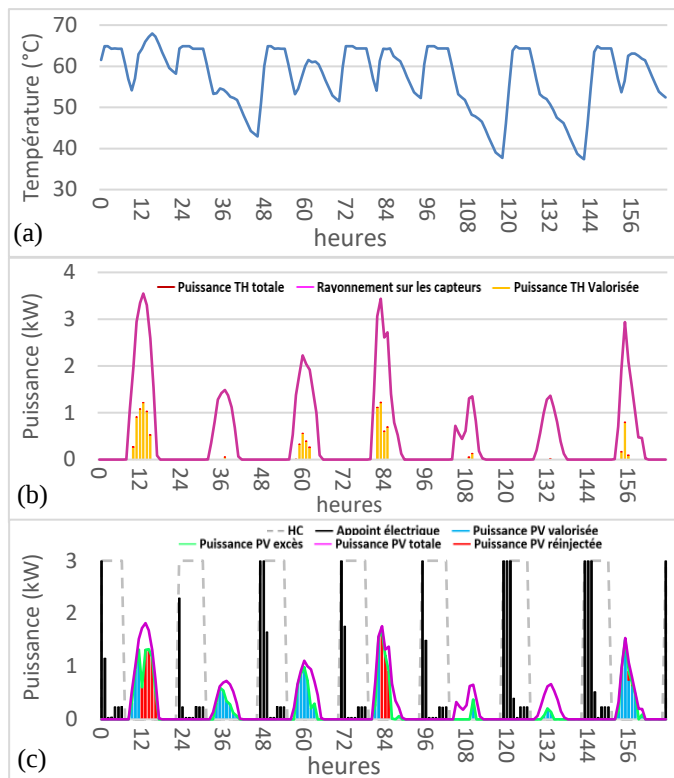


Fig. 12. Profils horaires de la température du ballon (a) et les flux de puissances thermiques (b) et électrique (c) entrants dans le ballon durant une semaine d'hiver

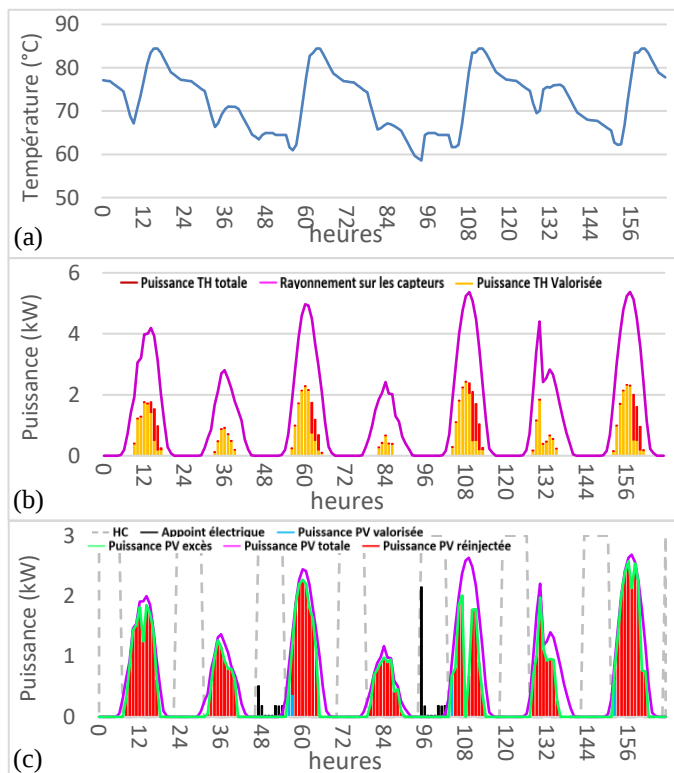


Fig. 13. Profils horaires de la température du ballon (a) et les flux de puissances thermiques (b) et électrique (c) entrants dans le ballon durant une semaine d'été

3.6. Comparaison des configurations

Les indicateurs résultants des simulations sur une année au pas horaire des différentes configurations sont synthétisés dans le tableau 2.

Tableau 2. Résultats et indicateurs issus des simulations

		Config. 1	Config. 2	Config. 3	Config. 4
Prélèvement du réseau (MWh _e /an)	Total	6,73	4,74 (-29,6%)	4,03 (-40,1%)	3,26 (-51,6%)
	CED	3,34	3,34	2,19	2,19
	ECS	3,39	1,40	1,84	1,07
ER (ST) (MWh _{th} /an)	Disponible	0	2,27	0	2,15
	Consommée	0	2,06	0	1,93
ER (PV) (MWh _e /an)	Disponible	0	0	4	4
	Consommée	Total	0	2,75	1,64
		CED	0	1,15	1,15
		ECS	0	1,60	0,49
	Réinjectée	0	0	1,25	2,37
Taux d'autoconsommation		0%	91%	68,7%	57,9%
Apport des ER aux besoins de	CED	0%	0%	34,5%	34,5%
	ECS	0%	64,9%	50,4%	75,8%
Efficacité de l'installation	ST	-	25,2%	-	23,5%
	PV	-	-	12,4%	7,37%

L'intégration d'une installation solaire thermique (configuration 2) a permis de couvrir environ 65% des besoins en ECS tout en réduisant la dépendance au réseau électrique de 29,6%. Le taux d'autoconsommation atteint 91%, indiquant que 9% de l'énergie thermique produite n'a pas été valorisée, soit en raison d'un ballon ayant atteint sa température maximale préconisée, soit parce que la température à la sortie des panneaux était inférieure à celle du ballon.

L'électricité d'origine photovoltaïque (configuration 3) a couvert 34,5% du besoin des charges électrodomestiques et environ 50% de ceux liés à la production d'eau chaude sanitaire, réduisant ainsi le recours au réseau électrique d'environ 40%. Le taux d'autoconsommation de cette installation photovoltaïque est de 68,7%, en raison de la quantité d'électricité réinjectée sur le réseau, particulièrement en été. Bien que l'apport du PV au besoin de l'ECS est moindre que dans la configuration 2, il est intéressant de voir que l'énergie prélevée au réseau est globalement inférieure à celle de la configuration 2.

La dernière configuration montre que plus des trois quarts des besoins en eau chaude sanitaire sont désormais assurés par de l'énergie renouvelable. Grâce à la gestion de l'énergie des PV, ceux-ci viennent compléter les capteurs thermiques (de 64,9% à 75,8%) marquant une amélioration de +10% par rapport à la configuration 2.

Même si on enregistre une baisse du taux d'autoconsommation ainsi que l'efficacité des installations d'énergies renouvelables en termes de pourcentage, cette intégration significative des énergies renouvelables permet de réduire de moitié la quantité d'électricité prélevée sur le réseau électrique, dépassant ainsi les performances des autres configurations.

4. CONCLUSION

Un bâtiment entièrement alimenté par le réseau électrique pour ses usages domestiques, son chauffage et sa production d'eau chaude sanitaire devient une solution peu viable économiquement. Cette dépendance entraîne une hausse des coûts en raison de l'augmentation du prix de l'électricité et de la faible part des énergies renouvelables dans le mix énergétique du réseau.

Dans cette étude, les auteurs ont évalué l'impact de différentes configurations de production locale d'énergie renouvelable sur la consommation énergétique d'un habitat

individuel situé en région nantaise. L'analyse des résultats a révélé que l'installation de panneaux solaires thermiques permet de couvrir 65% des besoins en eau chaude sanitaire, tout en réduisant la dépendance au réseau électrique de 30%. Par ailleurs, une installation photovoltaïque permet de satisfaire un tiers des besoins en électricité pour les appareils électroménagers et environ la moitié des besoins en eau chaude, diminuant ainsi la dépendance au réseau de 40 %. Bien que le recours combiné au solaire thermique et au photovoltaïque ait permis de réduire significativement la dépendance au réseau, l'efficacité de ces systèmes a diminué, suggérant qu'une solution intégrant à la fois le photovoltaïque et le solaire thermique n'est pas toujours optimale. Des essais expérimentaux réalisés sur ces configurations, présentés dans [6], confirment la validité des résultats obtenus par simulation.

Une proposition pour améliorer l'efficacité d'un système associant le photovoltaïque et le thermique consisterait à optimiser leur gestion, en intégrant des stratégies de gestion intelligente permettant une répartition plus efficace de l'énergie produite, entre le photovoltaïque destiné à couvrir les besoins des charges électrodomestiques et le solaire thermique exclusivement pour la production d'eau chaude sanitaire.

La simulation d'un habitat résidentiel quant à elle a permis non seulement de tester différentes configurations mais aussi de mettre en avant de nombreuses pistes d'amélioration, parmi lesquelles l'intégration d'une gestion des flux de puissances à la fois électrique et thermique, l'application d'une gestion des stockages et enfin, le pilotage des charges. La prise en compte du coût des équipements et du prix prévisible du kilowattheure électrique pourraient donner lieu à une optimisation technico-économique.

5. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été partiellement financés par les régions Bretagne et Pays de la Loire dans le cadre du projet SERRE+.

6. REFERENCES

- [1] L. Amabile, « Conception of energy management systems for residential photovoltaic self-consumption installations », phdthesis, Université Paris sciences et lettres, 2021. Consulté le: 5 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.hal.science/tel-03630448>
- [2] J. Arkhangelski, « Autoconsommation et optimisation de la gestion énergétique des bâtiments », phdthesis, Université Paris-Est, 2021. Consulté le: 5 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03429658>
- [3] R. M. Badreddine, « Gestion énergétique optimisée pour un bâtiment intelligent multi-sources multi-charges : différents principes de validations », phdthesis, Université de Grenoble, 2012. Consulté le: 2 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-00780209>
- [4] « https://theses.hal.science/tel-03556786v1/file/2020MULH3281_these_TRIKI.pdf ». Consulté le: 11 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-03556786v1/file/2020MULH3281_these_TRIKI.pdf
- [5] L. Chahwane, « Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments », These de doctorat, Grenoble, 2011. Consulté le: 27 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2011GRENA017>
- [6] F. Huide, Z. Xuxin, M. Lei, Z. Tao, W. Qixing, et S. Hongyuan, « A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems », *Energy Conversion and Management*, vol. 140, p. 1-13, mai 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.02.059.
- [7] « Chauffer l'eau avec le soleil », Agir pour la transition écologique | ADEME. Consulté le: 12 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/maison/chauffage/chauffer-leau-soleil>