



HAL
open science

Optimisation multicritère et analyse de cycle de vie de bâtiments zéro-énergie

Mija Frossard, Bruno Peuportier, Patrick Schalbart

► **To cite this version:**

Mija Frossard, Bruno Peuportier, Patrick Schalbart. Optimisation multicritère et analyse de cycle de vie de bâtiments zéro-énergie. IBPSA France: Conférence Francophone de l'International Building Performance, May 2018, Bordeaux, France. hal-01982633

HAL Id: hal-01982633

<https://hal.science/hal-01982633v1>

Submitted on 15 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Optimisation multicritère et analyse de cycle de vie de bâtiments zéro-énergie

Mija Frossard*¹, Bruno Peuportier¹, Patrick Schalbart¹

¹ MINES ParisTech – PSL Research University
CES (Centre efficacité énergétique des systèmes)
60 boulevard Saint-Michel, F-75272 Paris Cedex 06
[*mija.frossard@mines-paristech.fr](mailto:mija.frossard@mines-paristech.fr)

RESUME. L'article présente une méthode d'optimisation multicritère (critères de consommation d'énergie finale et de coût d'investissement relatif) basée sur un algorithme génétique NSGA-II couplé à un modèle de simulation énergétique dynamique (COMFIE). La méthode est appliquée à un cas d'étude de type maison passive situé en Bulgarie, dans le cadre du projet européen AZEB (Affordable zero energy building), afin de déterminer des solutions zéro-énergie à moindre coût d'investissement. Des conceptions de différents niveaux de performance sont identifiées au sein du front de Pareto dont les impacts environnementaux sont évalués par analyse de cycle de vie (ACV, Equer). Les résultats montrent que pour identifier des solutions à énergie positive efficaces en termes de coûts et d'impacts environnementaux et éviter d'aboutir à des conceptions sous-optimales, il est recommandé d'intégrer à l'algorithme d'optimisation une fonction objectif tirée de l'ACV ou de compléter l'optimisation par une étude ACV.

MOTS-CLÉS : optimisation multicritère, analyse de cycle de vie, bâtiment zéro-énergie

ABSTRACT. This article presents a multicriteria optimization method (criteria of final energy consumption and relative investment costs) based on a genetic algorithm (NSGA-II) coupled with a building performance simulation model (COMFIE). The optimization is applied to a passive house case study based in Bulgaria in the frame of from the european project AZEB (Affordable zero energy building). Designs from different levels of performance have been identified among the Pareto-optimal front and life cycle analysis (LCA, Equer) has been applied to assess their environmental impacts. LCA results analysis steer a recommendation to include an LCA objective function in the optimisation process or to complete optimisation study with LCA in order to identify energy plus solutions that are efficient in terms of cost and environmental impacts, and in order to avoid sub-optimal designs.

KEYWORDS : multicriteria optimization, life cycle assessment, zero-energy building

1. INTRODUCTION

La « Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiment » de 2010 énonce l'objectif de bâtiments neufs « quasi zéro-énergie » à l'horizon 2020 dans tous les pays de l'UE (European Parliament and Council of the European Union 2010). Le concept de bâtiment zéro-énergie repose sur un bilan énergétique annuel net qui soit nul et sur la capacité du bâtiment à produire de l'énergie qui sera réinjectée sur le réseau. Afin de limiter le surcoût de construction des bâtiments zéro-énergie, il est nécessaire de développer des outils d'aide à la décision capables d'identifier les solutions de conception les plus économiques pour chaque cas unique de bâtiment parmi un large éventail de possibilités techniques. L'optimisation multicritère couplée à un modèle de simulation énergétique du bâtiment permet de minimiser la consommation énergétique finale annuelle nette et le coût de

construction en explorant un vaste espace de recherche de manière rapide et automatisée, apportant un gain de temps et d'efficacité au concepteur. Néanmoins il est important d'intégrer l'utilisation d'outils d'ACV afin de vérifier l'efficacité du rapport entre coûts d'investissement et impacts environnementaux de la conception identifiée, notamment lorsque la procédure de conception est principalement guidé par la performance énergétique.

La méthode est appliquée à un cas d'étude de type maison passive situé en Bulgarie. L'objectif est d'établir, à partir des résultats d'optimisation, des recommandations de conception pour que le cas de base atteigne un niveau zéro-énergie pour un surcoût d'investissement minimal. Une étude ACV est réalisée afin de vérifier que l'optimisation multicritère en énergie et en coût est cohérente avec l'objectif de réduire les impacts environnementaux du bâtiment. Différentes solutions de référence sont identifiées parmi le front de Pareto résultant de l'optimisation et leurs impacts sont comparés par diagramme radar. En conclusion des recommandations sont données quant à la nécessité d'utiliser l'outil ACV en optimisation ou, de manière générale, en conception de bâtiments zéro-énergie et à énergie positive.

2. METHODOLOGIE

2.1. ALGORITHME D'OPTIMISATION NSGA-II

L'algorithme NSGA-II développé par (Deb et al. 2002) fait parti de la famille des algorithmes génétiques. Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation méta-heuristique qui s'inspirent de la théorie Darwinienne de l'évolution. Le processus est itératif et consiste à faire évoluer, de génération en génération, une population de solutions. NSGA-II a la particularité d'être élitiste : les individus sont évalués et classés selon leur niveau de dominance sur les fonctions objectifs et les solutions non-dominées sont sélectionnées pour établir la génération suivante. Des opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués pour renouveler la population à chaque génération et converger vers les solutions optimales du problème tout en diversifiant l'exploration de l'espace de recherche. La gestion de multiples fonctions objectifs en optimisation implique de résoudre des objectifs parfois contradictoires. Cet aspect est géré dans l'algorithme NSGA-II par le concept de dominance des solutions qui permet de conserver le caractère réellement multi-objectif du problème en ne procédant pas à une agrégation pondérée des fonctions objectifs en une seule fonction objectif globale (Evins, 2013). Un front de Pareto des solutions optimales non-dominées, couvrant l'ensemble des compromis de performances sur toutes les fonctions objectifs est déterminé à l'issue du processus d'optimisation.

L'algorithme NSGA-II est implémenté dans l'outil *Amapola* lié au logiciel *Pleiades*. Développé par l'équipe *Kooliko*¹, le module d'optimisation *d'Amapola* repose sur les travaux de Recht (2016) sur l'optimisation par algorithme génétique appliquée à l'éco-conception de bâtiment à énergie positive.

2.2. MODELE DE SIMULATION ENERGETIQUE DYNAMIQUE COMFIE

Le modèle de simulation énergétique dynamique (SED) utilisé est COMFIE (Bruno Peuportier and Blanc-Sommereux 1990). Dans ce modèle le bâtiment est divisé en zones thermiques, ces zones sont considérées à température opérative homogène. Un maillage par discrétisation en volumes finis est

¹ <http://www.kooliko.co/>

réalisé. Pour chaque zone les murs sont découpés en mailles suffisamment fines pour être à température homogène et une maille supplémentaire regroupe le volume d'air, le mobilier et les cloisons intérieures. Un bilan thermique est appliqué à chaque maille, ce qui peut être représenté au niveau de la zone par un système linéaire continu et invariant. Une méthode de réduction modale est utilisée afin de réduire les temps de calcul. Les systèmes matriciels réduits de chaque zone sont regroupés par une procédure de couplage. Les sorties à chaque pas de temps sont calculées en fonctions des sollicitations intérieures (émissions de chaleur des occupants et des équipements) et extérieures (température extérieure, rayonnement solaire) du bâtiment. Les phénomènes non linéaires (ventilation) ou les paramètres variables (résistance supplémentaire liée aux occultations) sont pris en compte par correction du vecteur des sollicitations. Le modèle a été validé *via* la procédure internationale BESTEST de comparaison numérique des modèles référence (Judkoff and Neymark 1995, 2013) et sa fiabilité a été plusieurs fois étudiée dans le contexte particulier de bâtiments à haute performance (Brun et al. 2009; Munaretto et al. 2013; Recht et al. 2014).

La surcouche logicielle *Pleiades* réalise l'interfaçage entre l'algorithme d'optimisation et le moteur de calcul COMFIE. Après avoir réalisé le croisement et généré la composition de la génération suivante, l'algorithme d'optimisation transmet à *Pleiades* les données de conception des solutions à faire évaluer par COMFIE. Les coûts d'une variante sont calculés dans *Pleiades* à partir des données de coûts indiqués par l'utilisateur chaque composant. Les résultats de simulation issus du modèle et les coûts sont transmis à l'algorithme d'optimisation qui évalue et classe les solutions sur les fonctions objectifs.

2.3. ANALYSE DE CYCLE DE VIE

L'analyse de cycle de vie est une méthode normalisée d'évaluation et de comparaison des impacts environnementaux de produits, systèmes ou services ayant la même unité fonctionnelle. Cette approche holistique et multicritère vise à quantifier les impacts d'un produit à partir d'un inventaire de cycle de vie. Cet inventaire répertorie l'ensemble des substances extraites et émises dans la biosphère à toutes les étapes du cycle de vie du produit : de la production à la fin de vie, en passant par la phase d'utilisation. Les impacts sont évalués à travers le calcul d'indicateurs environnementaux qui font le lien entre les substances de l'inventaire et des catégories d'impacts sur l'environnement et la santé humaine. Equer est un outil d'ACV des bâtiments et des quartiers (Polster 1995; Popovici 2005) dont la fiabilité a été étudiée par inter-comparaison avec d'autres d'outils ACV (Peuportier et al. 2004; Salmon et al. 2011). Dans un bâtiment conventionnel, la majeure partie des impacts environnementaux provient de la phase d'utilisation notamment à cause de la longue durée de vie de celui-ci. Les impacts et les flux liés à cette phase d'utilisation doivent donc être évalués de manière précise à travers la simulation par un modèle de SED performant. Pour assurer une évaluation fiable des impacts liés à la consommation d'énergie en phase d'utilisation, Equer est couplé au modèle de SED COMFIE. Le couplage consiste à transférer les simulations de consommation, la géométrie et les données de construction depuis COMFIE vers l'inventaire constitué par Equer. D'autres informations sont saisies par l'utilisateur : consommations d'eau, production de déchets ménagers, choix des fiches d'impacts des procédés, de la fabrication des composants et des fins de vie. Ces fiches proviennent de la base de données Ecoinvent v2.2 (Frischknecht 1998). Enfin, les impacts du bâtiment sont calculés selon 12 indicateurs environnementaux.

3. ETUDE DE CAS

3.1. PRESENTATION GENERALE

Le bâtiment résidentiel étudié est certifié Maison Passive. Situé en Bulgarie, il a été fourni par le constructeur Bulgare Oberon, partenaire dans le cadre du projet européen AZEB (« Affordable Zero-Energy Building »). Ce projet vise à mettre au point une méthodologie permettant la conception, la rénovation et le suivi de bâtiment zéro-énergie à moindre coût. Le cas d'étude présente un intérêt particulier car il est certifié selon la référence internationale passive. Des leviers de réduction des impacts environnementaux peuvent être identifiés pour un type de bâtiment déjà très performant.

Dans un premier temps les fonctions objectifs choisies pour l'optimisation sont les suivantes : la minimisation du bilan annuel net d'électricité (la consommation énergétique n'est constituée que d'électricité) et la minimisation du coût d'investissement. Des données météo bulgares de l'année 1995 sont utilisées et la course du soleil est simulée pour les coordonnées géographiques réelles du bâtiment. Le modèle est divisé en quatre zones dont deux zones chauffées : une zone « Jour » chauffée à une température moyenne de 20,3°C et une zone « Nuit » chauffée à une température moyenne de 19,6°C. Les scénarios de consigne de température, d'occupation, de consommation d'ECS et d'électricité spécifique sont générés par un modèle stochastique d'occupation développé par Vorger (2014) et implémenté dans le logiciel *Amapola*. Le modèle a été calibré sur les données de l'Enquête Emploi du Temps de l'INSEE² et génère des scénarios d'usages détaillés et réalistes. L'occupation est considérée pour une famille de quatre personnes.



Figure 1 - Maquette 3D du cas d'étude. Maison Passive située en Bulgarie (source : Oberon)

3.2. ESPACE DE RECHERCHE

Les variables de conception explorées sont indiquées en Tableau 1. Dans le cas de base, toutes les parois donnant sur l'extérieur ou sur une zone non chauffée ont une épaisseur d'isolant de 25 cm. Cela concerne neuf types de parois différentes : plancher sur terre-plein, plancher sur vide sanitaire, toiture terrasse en RDC, mur donnant sur une pièce non chauffée (vide sanitaire, garage), mur extérieur,

² <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2118074>

plancher des combles, mur extérieur des combles. Toutes les fenêtres du cas de base sont en triple vitrage. Afin de réduire les dimensions de l'espace de recherche et de respecter une certaine cohérence architecturale dans les types de vitrage proposés au constructeur, les fenêtres ont été rassemblées par orientation, niveau et zone thermique. Le nombre de fenêtres à faire varier dans l'optimisation passe ainsi de quatorze à neuf. Une surface de panneaux solaires photovoltaïques de 33m² est installée en toiture orientée Sud. La borne supérieure de variation de la surface photovoltaïque est définie par rapport à la surface de toiture disponible de 63m².

Les données de coûts sont définies pour chaque valeur possible des paramètres de conception et permettent d'évaluer le surcoût par rapport à la variante initiale. Ces données de coûts sont fournies par le constructeur et sont confidentielles.

Tableau 1 - Espace de recherche de l'optimisation

Elément : paramètre	Nombre	Valeur de base	Espace de recherche	Unité
Parois extérieures et sur LNC : épaisseur d'isolant	7	25 cm	[10, 15, 20, 25, 30, 35]	cm
Fenêtres : Type de vitrage	9	Triple vitrage	[Double vitrage, Triple vitrage]	-
Fenêtres : surface de chaque fenêtre	9	Base	[-10%, base, +10%]	m ²
Panneau solaire PV : surface totale	1	33 m ²	[25, 33, 40, 50, 60]	m ²

3.3. HYPOTHESES DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

L'unité fonctionnelle considérée est 1 m² de logement d'une maison résidentielle bulgare habitée par 4 occupants pendant 80 ans correspondant au standard de confort thermique de la maison passive (taux d'inconfort sur l'année < 10 %). Les équipements sont remplacés tous les 20 ans, les menuiseries sont remplacées tous les 30 ans. Le mix électrique considéré est le mix moyen bulgare de 2015, basé sur les données provenant du site internet de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA)³. Le chauffage est assuré par une pompe à chaleur électrique. L'ECS est fournie par 4m² de capteurs solaires thermiques dont l'appoint est assuré par de l'électricité. La consommation moyenne d'eau froide, la production de déchets ménagers et le transport des occupants ne sont pas considérés car ils ne sont pas influencés par l'espace de recherche de l'optimisation. Les fins de vie considérées sont le recyclage des métaux et l'incinération du bois, des fenêtres et des isolants. Le reste des composants est considéré comme déchets inertes en fin de vie.

³ <https://www.iea.org/statistics/statisticsearch/report/?country=Bulgaria&product=electricityandheat>

4. RESULTATS

4.1. RESULTATS DE L'OPTIMISATION

Des solutions de référence sont identifiées dans le front de Pareto (Figure 2): le cas de base (bleu), la solution de même performances énergétique que le cas de base à coût optimisé (jaune) ; une solution zéro-énergie (vert foncé) ; la solution à énergie positive la plus performante énergétiquement (rouge). Les caractéristiques des solutions de référence sont indiquées en Tableau 2 - Caractéristiques des solutions de référence.

Par rapport au cas de base (bleu), son homologue énergétique à moindre coûts (jaune) implique une réduction globale des épaisseurs d'isolants, la réduction des surfaces de fenêtres et leur passage en double vitrage afin de réduire les coûts liés à l'enveloppe. Ceci induit une augmentation des besoins de chauffage qui est compensée par l'installation de 7 m² supplémentaire de panneaux solaires photovoltaïques. Les caractéristiques d'enveloppe des solutions zéro-énergie (vert foncé) et BEPOS (rouge) montrent que le cas de base est sous-optimal à cause de parois inutilement sur-isolées et de surfaces de fenêtres légèrement surdimensionnées. La réduction des surfaces des fenêtres diminue les besoins de chauffage et les coûts de construction liés à l'enveloppe. C'est ainsi que les solutions zéro-énergie et BEPOS, si elles présentent globalement moins d'épaisseurs d'isolant, conservent des besoins de chauffage proches du cas de base, voire réduits. Enfin, le surcoût de construction est investi dans une plus grande surface de solaire PV dont la production permet d'atteindre l'objectif zéro-énergie et l'énergie positive.

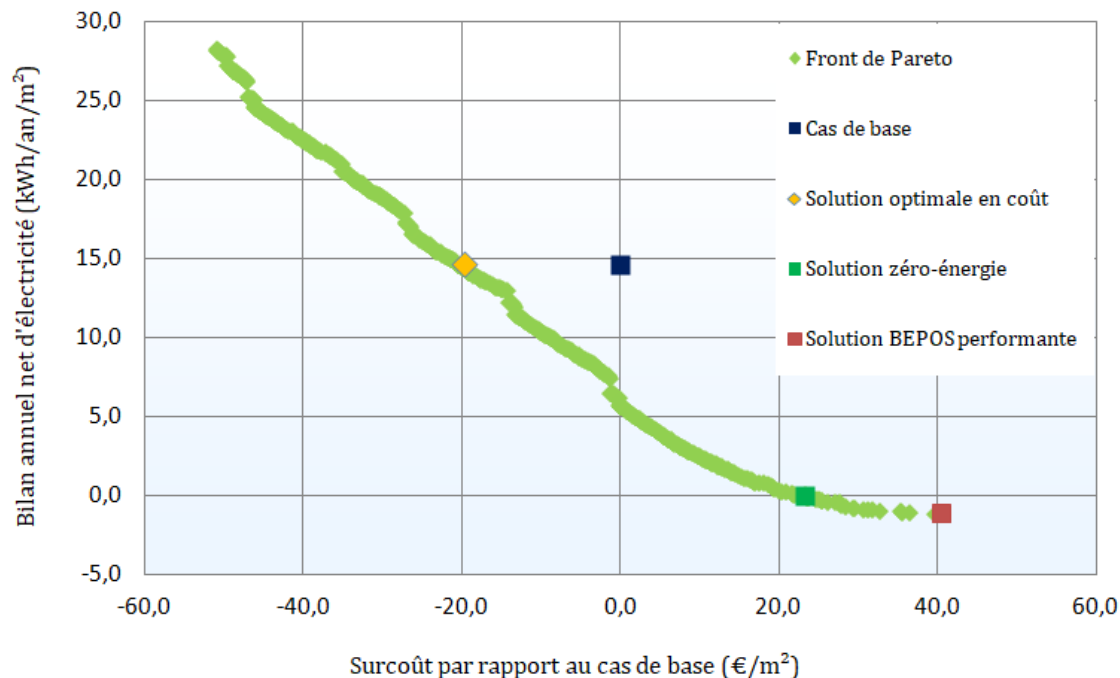


Figure 2 - Front de Pareto et solutions de référence sélectionnées

Tableau 2 - Caractéristiques des solutions de référence

Variante	Bilan net annuel d'élec (kWh/m ² /an)	Surcoût / cas de base (€/m ²)	Besoins chauffage (kWh/m ²)	Epaisseur isolant (cm)	Taux triple vitrage (%)	Surface PV (m ²)	Surface de fenêtre / cas de base (%)
Cas de base	14,6	0	13	25	100%	33	-
Coût optimale	14,7	-19,7	23	Min : 10 Max : 20	10%	40	-9%
Zéro-énergie	0	23,4	14	Min : 10 Max : 25	99%	60	-9%
BEPOS performante	-225	40,4	11	Min : 20 Max : 35	100%	60	-9%

4.2. RESULTATS DE L'ACV

Les figures ci-dessous Figure 3 – Comparaison des impacts des variantes de référence sur leur cycle de vie présentent les comparaisons des impacts environnementaux sur leur cycle de vie des différentes variantes de référence. Tout d'abord, les résultats montrent que la variante passive optimale en coûts (jaune) a des impacts environnementaux équivalents à ceux du cas de base (bleu). Les différences d'impacts entre les phases respectives de construction et de rénovation se compensent sur le cycle de vie malgré des différences dans les taux d'isolation d'enveloppe et les surfaces de panneaux solaires. Les phases d'utilisation sont équivalentes en raison de bilans énergétiques nets identiques : les impacts liés à l'augmentation de la consommation d'électricité sont compensés par la production d'électricité des panneaux PV injectée sur le réseau. La comparaison entre le cas de base (bleu) et la solution zéro-énergie (vert foncé) montre qu'une réduction du bilan énergétique grâce à l'installation de panneaux PV supplémentaires permet une forte réduction des impacts sur le cycle de vie (-30 % d'émissions de CO₂ eq.) malgré l'augmentation des impacts liés aux remplacements des panneaux PV. Les impacts des phases de construction et de démolition des deux variantes sont proches. Enfin, la comparaison entre la variante zéro-énergie (vert foncé) et la variante BEPOS la plus performante (rouge) indique des impacts proches sur de nombreux indicateurs.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une optimisation multicritère a été appliquée à une maison passive afin d'identifier les leviers de réduction des coûts pour une performance passive identique et des variantes de référence : la variante zéro-énergie optimale et la variante BEPOS optimale la plus performante énergétiquement. Les variantes de référence ont ensuite été évaluées par analyse de cycle de vie.

Des recommandations de conception peuvent être tirées de l'analyse des résultats d'optimisation de ce cas d'étude. D'abord, il est important de définir les épaisseurs d'isolants suivant les types de parois pour éviter une sur-utilisation inutile de matériaux. Par ailleurs, il est important d'identifier des

surfaces et types de fenêtres optimales en fonction de la morphologie du bâtiment. De manière générale, il existe un équilibre énergétique optimal entre performance énergétique de l'enveloppe et production *via* les panneaux photovoltaïques. Cet équilibre optimal peut être identifié au moyen d'un algorithme d'optimisation pour assurer la conception d'un bâtiment zéro-énergie optimal.

Les résultats ACV des variantes de référence montrent que la pratique de l'optimisation visant à réduire la consommation d'énergie finale et les coûts d'investissement permet d'évoluer vers des solutions zéro-énergie à plus faibles impacts environnementaux. En revanche, les impacts de la variante « BEPOS la plus performante énergétiquement » sont égaux, voire supérieurs, aux impacts de la variante « zéro-énergie ». Une conclusion peut être tirée de ce résultat : concentrer l'optimisation sur les performances énergétiques risque d'aboutir à des solutions à énergie positive sous-optimales sur les critères environnementaux. Or, la motivation derrière la construction de bâtiments à haute performance énergétique est bien de réduire les impacts environnementaux et, si possible, à moindre coût. Il est donc recommandé d'utiliser l'ACV dans l'optimisation multicritère ou en vérification de conceptions, notamment dans le cas de bâtiments à énergie positive dont la conception a été principalement guidée par un critère énergétique. Cette approche permet d'éviter le risque de construire des bâtiments ayant un rapport entre coûts d'investissement et impacts environnementaux sous-optimal, qui gaspilleraient des ressources matérielles et financières. La généralisation de l'ACV dans les pratiques de conception est d'autant plus importante que le bâtiment à énergie positive deviendra prochainement la norme européenne, alors que sa définition technique est toujours floue.

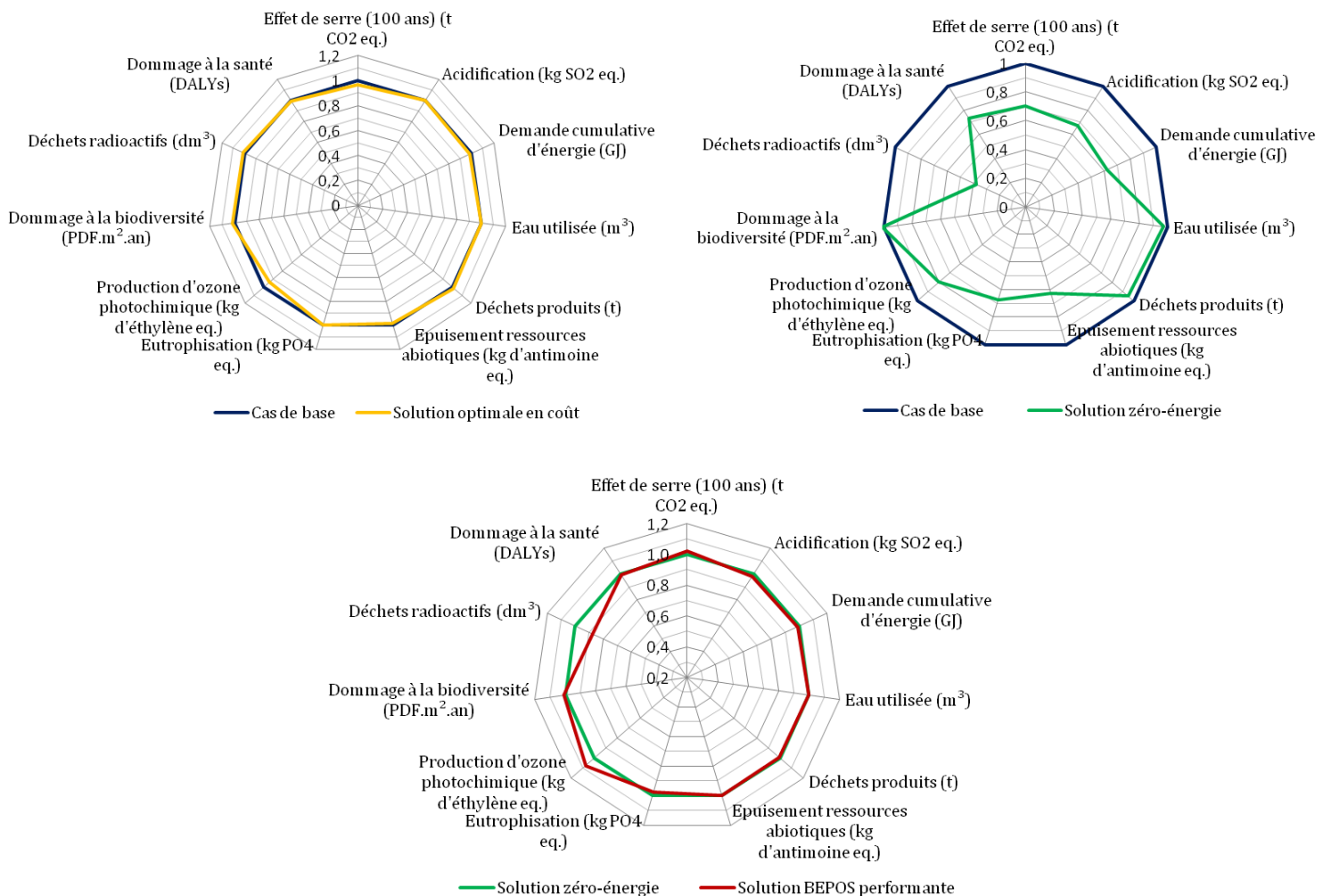


Figure 3 – Comparaison des impacts des variantes de référence sur leur cycle de vie

En outre, il convient de rappeler les limites du cadre de l'étude : le contexte bulgare est différent de celui de la France, par exemple en termes de coûts de construction et de composition du mix électrique. Dans la méthodologie utilisée dans *Equer*, les bénéfices environnementaux de la production d'un panneau solaire photovoltaïque dépendent de la composition du mix électrique qu'il permet d'éviter de consommer. Le mix électrique bulgare étant composé à 48 % de charbon, l'utilisation de panneaux photovoltaïques y est donc plus bénéfique en termes de réduction des impacts qu'en France où le mix comporte moins d'énergies fossiles. Ainsi, ce travail rappelle l'importance de traiter chaque cas de bâtiment dans son contexte et ses caractéristiques propres afin d'identifier une conception réellement optimale.

Enfin, une perspective de développement est l'intégration d'un modèle de mix électrique dynamique dans le processus d'optimisation (Roux et al. 2016). Cette amélioration permettrait de quantifier de façon plus précise les bénéfices environnementaux liés à la production des panneaux photovoltaïques, en prenant en compte le décalage entre la forte production photovoltaïque en été et les phénomènes de pointes hivernales où le taux d'énergies fossiles augmente dans le mix électrique.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet européen AZEB, financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne (grant agreement N° 754174).

6. BIBLIOGRAPHIE

- Brun, Adrien, Clara Spitz, Etienne Wurtz, and Laurent Mora. 2009. 'Behaviourial Comparison of Some Predictive Tools Used in a Low-Energy Building'. In *11th International IBPSA Conference*, 1185–90. Glasgow, Scotland.
- Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. 2002. 'A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II'. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (2): 182–97. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- European Parliament, and Council of the European Union. 2010. *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings. Official Journal of The European Union - L 153/13*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>.
- Evins, Ralph. 2013. 'A Review of Computational Optimisation Methods Applied to Sustainable Building Design'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (June): 230–45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>.
- Frischknecht, Rolf. 1998. 'Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making'. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 3 (2): 67–67. <https://doi.org/10.1007/BF02978487>.
- Judkoff, R., and J. Neymark. 2013. 'Twenty Years On!: Updating the IEA BESTEST Building Thermal Fabric Test Cases for ASHRAE Standard 140'. In *Proceedings of BS2013*, 63–70. Chambéry, France. <https://doi.org/10.2172/1220110>.
- Munaretto, Fabio, Bruno Peuportier, and Alain Guiavarch. 2013. 'Accounting for thermal mass in thermal simulation tools: comparison of several assumptions'. In *Proceedings of BS2013*. Chambéry, France. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1266.pdf.

- Peuportier, B., D. Kellenberger, D. Anink, H. Mötzl, J. Anderson, S. Vares, J. Chevalier, and H. König. 2004. 'Inter-Comparison and Benchmarking of LCA-Based Environmental Assessment and Design Tools'. In *Sustainable Building Conference 2004*. Warsaw, Poland.
- Peuportier, Bruno, and Isabelle Blanc-Sommereux. 1990. 'Simulation Tool with Its Expert Interface for the Thermal Design of Multizone Buildings'. *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109–20. <https://doi.org/10.1080/01425919008909714>.
- Polster, Bernd. 1995. 'Contribution à l'étude de l'impact Environnemental Des bâTiments Par Analyse Du Cycle de Vie'. Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.
- Popovici, Emil. 2005. 'Contribution to the Life Cycle Assessment of Settlements'. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris: École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Judkoff, R., and J. Neymark. 1995. 'International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method'. NREL/TP-472-6231. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/6231.pdf>.
- Recht, Thomas. 2016. 'Étude de l'écoconception de Maisons à Énergie Positive'. Thèse de doctorat, Paris: École nationale supérieure des mines de Paris.
- Recht, Thomas, Fabio Munaretto, Patrick Schalbart, and Bruno Peuportier. 2014. 'Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif'. In *IBPSA France 2014*, 9. Arras, France. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01461407/document>.
- Roux, Charlotte, Patrick Schalbart, and Bruno Peuportier. 2016. 'Accounting for Temporal Variation of Electricity Production and Consumption in the LCA of an Energy-Efficient House'. *Journal of Cleaner Production* 113 (February): 532–40. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.052>.
- Salmon, N., L. Duclos, B. Peuportier, G. Herfray, J. Chevalier, N. Schiopu, S. Lasvaux, et al. 2011. 'Connaissance de l'impact Environnemental Des bâTiments - COIMBA 2011, Développement Des Outils d'évaluation de La Qualité Environnementale Des bâTiments Par Analyse de Cycle de Vie'. Nobatek, ARMINES, CSTB, IZUBA Energies, ENERTECH. http://www.nobatek.com/downloads/Etudes%20publiques/Coimba_Synthese_NOBATEK.pdf.
- Vorger, Eric. 2014. 'Étude de l'influence Du Comportement Des Occupants Sur La Performance Énergétique Des bâTiments'. Thèse de doctorat, École nationale supérieure des Mines de Paris.