

Identification de paramètres incertains influents en analyse de cycle de vie des bâtiments

Marie-Lise Pannier*¹, Patrick Schalbart¹, Bruno Peuportier¹

¹ MINES ParisTech PSL – CES (Centre d'Efficacité Énergétique des Systèmes)
60 Bd Saint Michel 75272 Paris Cedex 06 - France,
[*marie-lise.pannier@mines-paristech.fr](mailto:marie-lise.pannier@mines-paristech.fr)

RESUME. Les outils d'analyse de cycle de vie (ACV) des bâtiments sont utilisés pour orienter la conception vers des ensembles bâtis plus durables. Ils doivent donc être des outils d'aide à la décision robustes. Or, les praticiens d'ACV sont confrontés à de nombreux choix (méthodes, scénarios, paramètres...) induisant des incertitudes dans les sorties du modèle et potentiellement une remise en question des résultats. Dans ce cadre, l'influence des paramètres incertains doit être mieux connue. Trois types d'analyses de sensibilité (le criblage de Morris et les analyses de sensibilité locale et globale), offrant différents compromis coût calculatoire - précision, ont permis d'identifier les paramètres les plus influents pour une maison individuelle performante. Ces travaux, menés avec l'outil d'ACV novaEQUER ont souligné l'influence de la durée de vie du bâtiment, du mix de production d'électricité et des contributeurs majeurs de l'efficacité énergétique de l'enveloppe. Une meilleure compréhension de l'effet des paramètres influents contribue à réduire l'incertitude et à fiabiliser les résultats d'ACV des bâtiments.

MOTS-CLÉS : Bâtiment, Analyse de cycle de vie, Analyses de sensibilité.

ABSTRACT. Building life cycle assessment (LCA) tools help designing more sustainable built environments and have therefore to be robust. However, LCA practitioners are facing a lot of choices (methods, scenarios, parameters values) inducing uncertainty in the results or model output and potentially changing the ranking of different project alternatives. It is necessary to better understand the influence of uncertain parameters. Three sensitivity analysis types (the Morris screening and the local and global sensitivity analysis), offering different computation time – precision compromise, were conducted in order to identify the most influential parameters in the case of an energy efficient single family house. In this work, performed with the building LCA tool novaEQUER, the building life span, the electricity mix and parameters affecting the envelope energy performance were identified as influential parameters. Better understanding them will help in reducing the uncertainty and making building LCA results more robust.

KEYWORDS: Building, Life Cycle Assessment, Sensitivity analysis.

1. INTRODUCTION

De part son approche multicritère et multi-étapes, la méthode normalisée (NF EN ISO 14040 2006) d'analyse de cycle de vie (ACV) est couramment employée pour évaluer et comparer les impacts sur l'environnement de systèmes rendant les mêmes services. Adapter l'ACV au secteur bâtiment, levier pour résoudre les défis énergétiques et environnementaux, permet d'orienter la conception ou la rénovation vers les variantes constructives les plus durables. Les outils d'éco-conception des ensembles bâtis doivent toutefois être suffisamment fiables pour guider les choix des décideurs vers les alternatives les plus performantes sur le cycle de vie complet du bâtiment incluant sa fabrication, son utilisation, sa démolition et ses éventuelles phases de rénovation. Cependant, lors des études

d'ACV, de nombreux choix peuvent altérer la robustesse des résultats. En effet, des hypothèses et scénarios doivent être définis sur le bâtiment et son usage ; la durée de vie d'un bâtiment est longue et les données relatives à l'évolution du contexte du bâtiment ou à sa fin de vie ne sont pas encore connues. De plus, les données environnementales relatives aux matériaux ou aux procédés utilisés dans le secteur du bâtiment peuvent ne pas être assez représentatives. Ces incertitudes sur les paramètres d'entrée sont susceptibles de remettre en question les choix. Afin de rendre les outils d'ACV des bâtiments plus robustes, il est nécessaire de mieux connaître les effets des paramètres incertains. Pour cela, des analyses de sensibilité ont été menées. Elles permettent de caractériser l'influence des paramètres d'entrée sur l'incertitude des indicateurs environnementaux calculés en sortie de l'outil d'ACV des bâtiments novaEQUER. Cette démarche a été appliquée sur le cas d'une maison individuelle performante.

2. METHODOLOGIE

2.1. MODELE D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

NovaEQUER (Polster 1995 ; Popovici 2005) est un outil d'ACV des bâtiments et des quartiers permettant d'évaluer les impacts d'un projet au travers de douze indicateurs environnementaux à chaque étape de la vie du bâti : construction, utilisation, rénovation et démolition. Du fait de la longue durée de vie des bâtiments, les impacts liés à l'utilisation sont prépondérants (Cabeza et al. 2014), ce qui nécessite d'évaluer cette phase avec précision. Pour ce faire, novaEQUER est couplé au modèle thermique dynamique de bâtiment COMFIE (Peuportier et Blanc-Sommereux 1990) et dans lequel le bâtiment est divisé en zones thermiques à température homogène avant d'être maillé. Un bilan thermique est ensuite effectué sur chaque maille pour aboutir aux températures et besoins de chauffage et climatisation par zone. COMFIE transmet à novaEQUER la géométrie et les besoins du bâti. La description de la phase d'utilisation est complétée par des informations sur les consommations d'eau, la production de déchets ou encore le transport des occupants. Pour les autres phases, des données environnementales issues de la base de donnéesecoinvent (Frischknecht et al. 2007) sont associées aux matériaux de construction du projet pour définir leurs modes de production et d'élimination. Enfin, les durées de vie des matériaux non structurels sont renseignées pour modéliser les rénovations.

2.2. PLATEFORME DE SIMULATION

Le traitement des incertitudes requiert généralement la réalisation d'un grand nombre d'évaluations du modèle. De plus, des traitements statistiques sont nécessaires pour analyser les effets des incertitudes. Une plateforme de simulation a donc été utilisée pour étudier l'influence des paramètres incertains. Elle est constituée des outils COMFIE et novaEQUER ainsi que de l'outil statistique R chargé de créer des plans d'expériences adaptés aux études, gérer les simulations et traiter les sorties.

2.3. CAS D'ETUDE

Pour déterminer quels paramètres ont le plus d'influence sur les sorties de l'outil novaEquer, la maison en béton banché (I-BB) de la plateforme INCAS au Bourget-du-Lac a été utilisée comme cas d'étude. Munaretto (2014) propose une description précise du bâtiment dans sa thèse. Des hypothèses spécifiques concernant l'habitation ont été prises pour cette étude. La maison est occupée et les scénarios liés à l'occupation correspondent à des scénarios usuels pour une habitation ayant quatre

pièces principales (Vorger 2014). Le chauffage est à l'électricité. Le transport des occupants et la production de déchets en phase d'utilisation ont été exclus de l'étude. De plus, tous les matériaux sont considérés comme des déchets inertes en fin de vie à l'exception du bois qui est incinéré.

Vingt-deux paramètres incertains ont été étudiés dans ce travail, ils sont présentés avec leurs plages de variation dans le tableau 1. Il s'agit essentiellement de paramètres incertains liés à des hypothèses sur le bâtiment ou son contexte, mais des incertitudes sur la méthodologie, l'inventaire de cycle de vie ou les méthodes de calcul des impacts environnementaux sont aussi représentées.

	Paramètres incertains	Distribution de probabilité	Unité	
Hypothèses sur le bâtiment et son contexte	Climat et site	Température extérieure	$N_r (\mu=0 ; \sigma=0.25)$	°C
	Climat et site	Rayonnement global horizontal	$N_r (\mu=0 ; \sigma=5)$	%
	Climat et site	Albédo	$U_r (\text{min}=-15 ; \text{max}= 15)$	%
	Scénario	Consigne de température	$N_r (\mu=0 ; \sigma=0.25)$	°C
	Scénario	Scénarios d'occupation	$N_r (\mu=0 ; \sigma=5)$	%
	Scénario	Scénarios d'apports internes	$N_r (\mu=0 ; \sigma=5)$	%
	Scénario	Scénarios de ventilation	$N_r (\mu=0 ; \sigma=5)$	%
	Enveloppe	Résistance thermique des fenêtres U	$N_r (\mu=0 ; \sigma=2.5)$	%
	Enveloppe	Facteur solaire des fenêtres Sw	$N_r (\mu=0 ; \sigma=2.5)$	%
	Enveloppe	Epaisseur d'isolant	$N (\mu=20 ; \sigma=0.25)$	cm
	Enveloppe	Epaisseur de béton	$N (\mu=15 ; \sigma=0.25)$	cm
	Enveloppe	Ponts thermiques	$N_r (\mu=15 ; \sigma=25)$	%
	Enveloppe	Surplus de matériaux (chantier)	$N (\mu=5 ; \sigma=3)$	%
	Durée de vie	Durée de vie du bâtiment	$N (\mu=80 ; \sigma=20)$	ans
	Durée de vie	Durée de vie des fenêtres	$N (\mu=35 ; \sigma=12)$	ans
	Durée de vie	Durée de vie des revêtements	$N (\mu=22 ; \sigma=7)$	ans
	Climat et site	Distance de transport usines-site	$N (\mu=75 ; \sigma=30)$	km
	Climat et site	Distance de transport site-décharge	$N (\mu=25 ; \sigma=10)$	km
	Contexte	Efficacité du réseau d'eau	$N (\mu=74 ; \sigma=13)$	%
	Méthodologie	Mix de production d'électricité	C [annuel ; horaire]	-
Données d'inventaire	Type de béton	C [normal ; précontraint]	-	
Méthode d'évaluation des impacts	Horizon temporel GIEC	C [20 ans ; 500 ans]	-	

Tableau 1 : Paramètres incertains et distributions de probabilité considérés. N =loi normale, U =loi uniforme et C = variable catégorielle, r : variation relative autour de la valeur de référence.

Pour les paramètres concernant des hypothèses sur le bâtiment, des plages de variation faibles ont été choisies car les caractéristiques de la maison I-BB sont bien connues et documentées. Une forte incertitude a toutefois été considérée pour les ponts thermiques car les données trouvées dans la littérature peuvent varier de manière significative pour un même pont.

Pour les variables catégorielles (discrètes et non ordonnées), il ne s'agit pas de définir une plage de variation autour d'une valeur de référence mais de choisir entre plusieurs scénarios possibles. Pour représenter différentes approches méthodologiques, deux mix de production d'électricité implémentés dans novaEquer ont été utilisés: un mix fixe sur l'année et un autre variant au pas de temps horaire et par usage. Les incertitudes sur les données d'inventaire ont été investiguées sur le cas du béton : des données environnementales pour un béton normal et un précontraint sont tirées à tour de rôle. Enfin, l'effet du choix de la méthode d'évaluation des impacts a été étudié en choisissant différents horizons temporels pour le potentiel de réchauffement global ; l'effet de serre dépendant de la vitesse de dégradation des gaz, l'horizon temporel retenu fait varier les résultats.

2.4. METHODES D'ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES INCERTAINS

Les méthodes d'analyse de sensibilité (AS), au sens de Saltelli et al. (2000), sont utilisées pour déterminer quels paramètres d'entrée contribuent le plus à l'incertitude en sortie. En ACV, ces méthodes sont souvent désignées par les termes d'analyse du problème-clé ou d'analyse de contribution (Heijungs et Kleijn 2001). Elles regroupent les analyses de perturbations (sensibilité du modèle aux paramètres d'entrée) et d'incertitudes pour obtenir l'influence des paramètres incertains.

2.4.1. L'analyse de sensibilité locale

En analyse de sensibilité locale (ASL), l'objectif est d'étudier l'effet de petites variations Δ autour des valeurs de référence des paramètres, en se basant sur le calcul de dérivées partielles. Cela peut être problématique pour les modèles non-linéaires tels que ceux utilisés en thermique. Pour de faibles plages de variation des paramètres d'entrée du modèle thermique, reflétant une bonne connaissance du bâtiment étudié, il est cependant possible de faire l'approximation de linéarité.

À tour de rôle, pour chaque facteur incertain (plan OAT pour *One-factor-At-a-Time*), l'effet du facteur considéré est investigué alors que tous les autres facteurs restent à leurs valeurs de référence. Des indices de sensibilité sont calculés pour chaque facteur $i \in [1; d]$. Dans le cadre de cette étude, il a été choisi de les calculer comme indiqué dans l'équation (1), en considérant l'écart entre les sorties du modèle aux bornes de l'intervalle $[\mu_i - 2\sigma_i; \mu_i + 2\sigma_i]$.

$$S_i = f(\mu_1, \dots, \mu_i + 2\sigma_i, \dots, \mu_d) - f(\mu_1, \dots, \mu_i - 2\sigma_i, \dots, \mu_d) \quad (1)$$

Le nombre de simulation à réaliser pour cette méthode correspond à deux fois le nombre de paramètres incertains considérés, soit 44 simulations pour ce cas d'étude.

2.4.2. Le criblage de Morris

Les méthodes de criblage permettent une exploration rapide de l'ensemble du domaine de variation des paramètres incertains pour évaluer de manière qualitative leur influence. L'avantage du criblage de Morris (1991) est qu'il est applicable quel que soit la complexité et la régularité du modèle.

Les plages de variation des facteurs incertains sont discrétisés en niveaux. L'hyper-espace exploré correspond alors à une grille de nœuds de dimension d (nombre de paramètres étudiés). La plage de variation retenue pour les paramètres continus est $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$ et 6 niveaux ont été considérés. Pour les variables catégorielles, deux niveaux, correspondant aux deux choix ont été pris en compte. Un plan d'expérience OAT est ensuite répété r fois, en partant à chaque répétition d'un point de départ différent tiré aléatoirement. Des effets élémentaires, mesurant l'accroissement du modèle, sont estimés à chaque répétition et pour chaque paramètre, comme présenté dans Munaretto (2014). La moyenne des valeurs absolues des effets élémentaires μ_i^* donne des informations sur l'influence du paramètre i : plus celle-ci est élevée, plus le paramètre i est influent. L'écart-type des effets-élémentaires σ_i permet de détecter la présence de non-linéarité ou d'interaction entre les paramètres.

Un nombre de simulation équivalent à $r \cdot (d + 1)$ est nécessaire, 1150 simulations pour 50 répétitions ont donc été réalisées.

2.4.3. L'analyse de sensibilité globale

Une analyse de sensibilité globale (ASG) a été réalisée pour quantifier plus précisément l'influence des différentes entrées incertaines sur l'incertitude en sortie. Cette méthode se base sur la

décomposition de la variance fonctionnelle. Les indices de Sobol (1993) totaux (TSI_i) ont été calculés pour chaque paramètre i , comme indiqué dans l'équation (2), avec Y la sortie du modèle pour la combinaison de valeur d'entrée $X = (X_1, \dots, X_d)$ et $Var(Y)$ et $E(Y)$ sa variance et son espérance. L'indice TSI_i évalue l'effet du paramètre i ainsi que ses interactions avec les autres entrées.

$$TSI_i = \frac{E(Var[Y|X_{\sim i}])}{Var(Y)} \quad (2)$$

Contrairement, aux méthodes présentées précédemment, pour lesquelles un nombre fini de points est exploré sur les domaines de variation des paramètres, une distribution de probabilité est considérée en ASG. Un échantillonnage par hypercube latin a été utilisé pour tirer les jeux de valeurs à simuler dans les distributions de chaque facteur incertain.

L'ASG permet une hiérarchisation plus précise de l'influence des entrées grâce à l'estimation de la part de la variance en sortie expliquée par chaque facteur incertain. Mais ce gain en précision fait augmenter le coût calculatoire. $Ntirage * (d + 2)$ évaluations du modèle sont requises, avec $Ntirage = 1000$ dans notre cas pour assurer la convergence. Au total, 24000 simulations du modèle sont nécessaires. Les simulations de l'ASG sont toutefois réutilisables dans le cadre d'une analyse d'incertitude pour étudier la distribution des sorties.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

L'influence relative des paramètres est représentée dans la suite pour chacune des méthodes d'analyse de sensibilité et pour les douze indicateurs environnementaux calculés dans novaEquer

Les indices de sensibilité ont été calculés pour l'ASL pour chaque facteur. Puis, ils ont été divisés pour chaque indicateur par la somme des indices. L'influence des paramètres ainsi obtenue est présentée à la figure 1, relativement à la somme des indices. Cette analyse a été réalisée en 4 min sur un ordinateur de bureau performant disposant de 6 cœurs.

Pour le criblage de Morris, la distance euclidienne entre l'origine et le point $(\mu_i^* ; \sigma_i)$ a été calculée pour chaque paramètre et pour tous les indicateurs environnementaux. Cette distance donne des informations sur l'effet d'un paramètre et de ses éventuelles non-linéarités ou interactions. Les résultats du criblage de Morris sont présentés à la figure 2, relativement à la somme des distances. Il a fallu 2h30 à un ordinateur de bureau performant pour réaliser tous les calculs.

Pour l'ASG, les résultats sont représentés à la figure 3. Le graphique a été construit de la même manière que celui de l'ASL à partir des indices de Sobol totaux, prenant en compte l'effet des paramètres et de leurs interactions avec d'autres paramètres. 18h ont été nécessaires pour ce calcul.

Les résultats donnés par l'ASL et le criblage de Morris sont proches. Dans les deux méthodes, la durée de vie du bâtiment apparaît comme un facteur très influent pour presque tous les indicateurs. Le choix d'un mix électrique annuel ou horaire induit également de fortes différences sur les sorties. Dans le criblage de Morris, l'influence de ce facteur est plus importante car les effets d'interactions avec les autres paramètres sont capturés. Les facteurs influençant fortement les performances énergétiques tels que les ponts thermiques, la température de consigne et la température extérieure se révèlent être également influents pour la performance environnementale. Cela est lié à l'importance de la phase d'utilisation en ACV des bâtiments. Le choix de la méthode d'évaluation des impacts environnementaux influence fortement les résultats, par exemple pour l'indicateur d'effet de serre.

Enfin, certains paramètres ont de l'influence particulièrement sur un indicateur, c'est le cas du rendement du réseau d'eau pour la consommation d'eau.

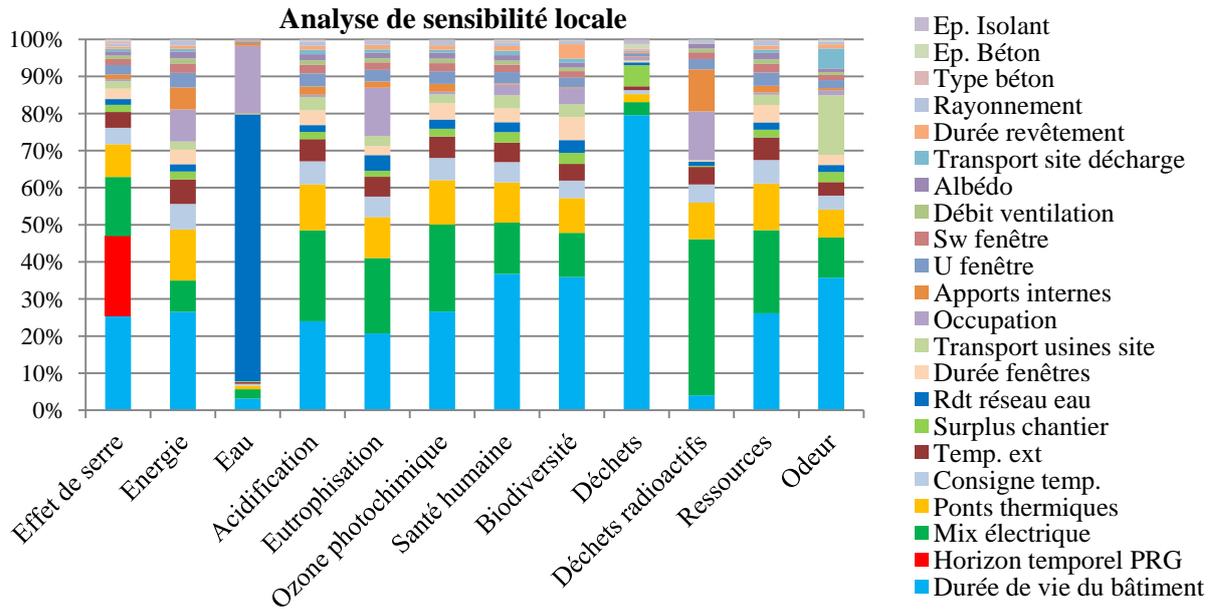


Figure 1 : Influence relative des paramètres incertains en analyse de sensibilité locale.

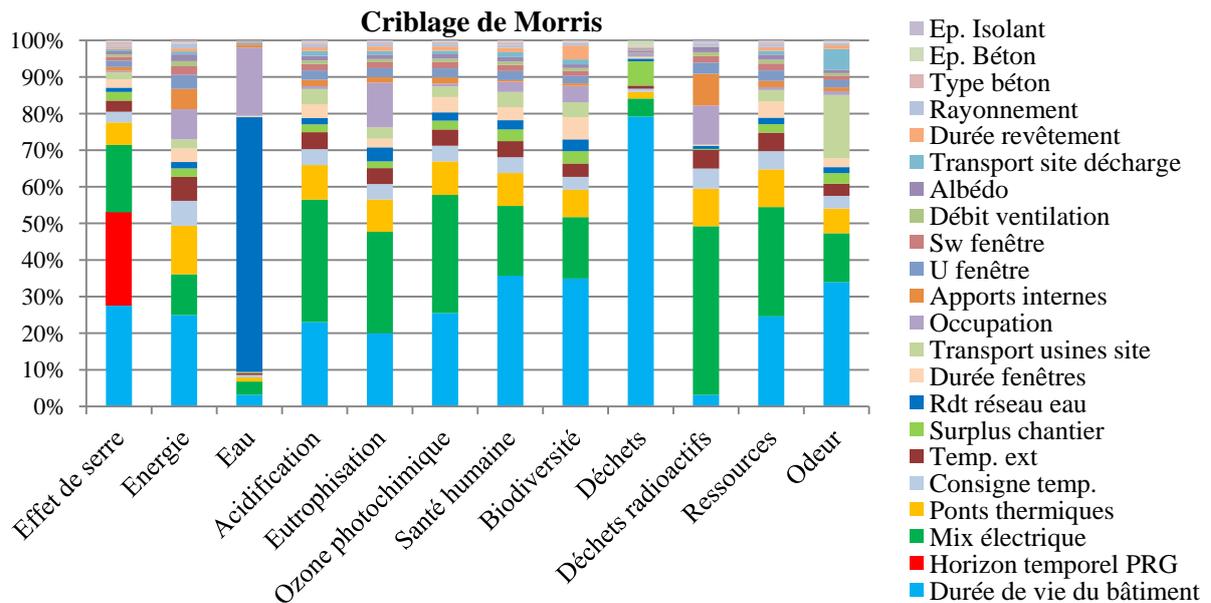


Figure 2 : Influence relative des paramètres incertains avec le criblage de Morris.

En ASG, la variabilité du modèle est majoritairement expliquée par le mix de production d'électricité pour la plupart des indicateurs. Pour l'effet de serre, la consommation d'eau et la production de déchets, la plus grande part de la variance est liée respectivement au choix de la méthode d'évaluation des impacts, au rendement du réseau d'eau et à la durée de vie du bâtiment, les indicateurs étant exprimés par annuité. Ces différences dans l'influence accordée à chaque paramètre pour les trois méthodes peuvent induire des remises en question du classement des facteurs incertains.

Les écarts constatés entre les trois analyses de sensibilité peuvent s'expliquer par la nature des méthodes employées. L'ASL, d'une part, ne permet pas de capturer les interactions ou les non-linéarités. D'autre part, la discrétisation de l'espace en une grille régulière dans le criblage de Morris

conduit à ne privilégier aucune zone des domaines de variation. Cela revient à faire implicitement l'hypothèse d'une distribution de probabilité uniforme pour tous les paramètres alors que des lois normales ont été choisies pour la plupart d'entre eux en ASG. Les non-linéarités ou interactions aux bords de l'intervalle sont donc mieux pris en compte dans le criblage de Morris. Enfin, les trois méthodes n'évaluent pas l'influence de la même manière. L'ASG calcule la contribution de la variance d'un paramètre à la variance totale tandis que l'ASL et le criblage de Morris estiment les effets des paramètres sur les incertitudes en sorties.

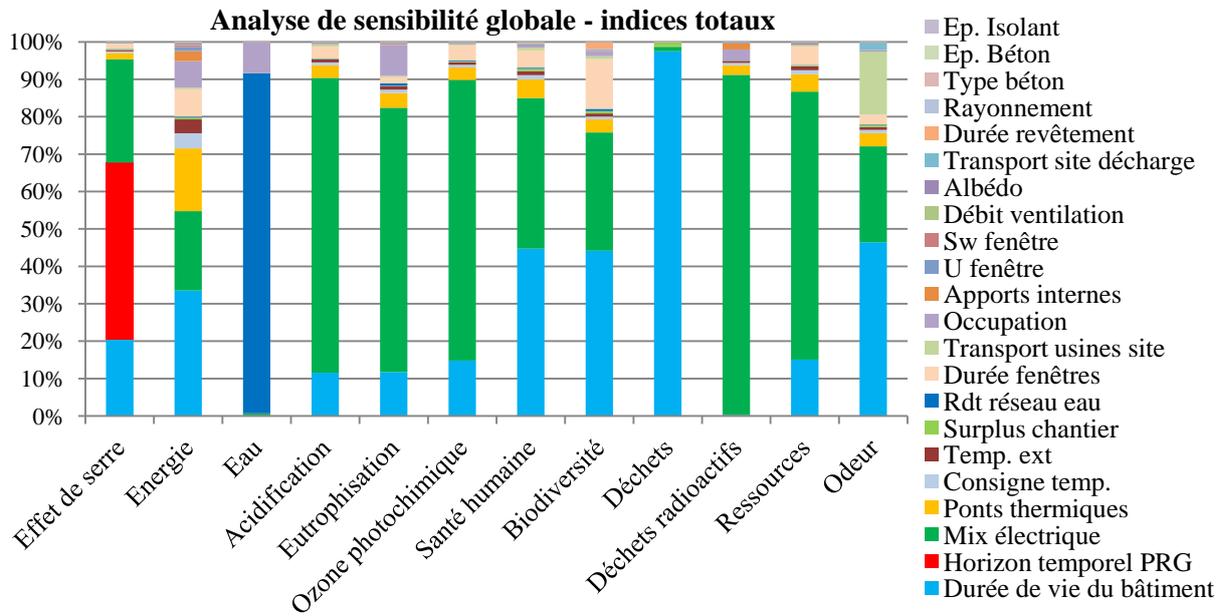


Figure 3 : Influence relative des paramètres incertains en analyse de sensibilité globale.

Bien que l'ASL et le criblage de Morris classent les paramètres différemment, ces deux analyses de sensibilité permettent de mettre en avant les paramètres fortement influents. En effet, les facteurs identifiés par l'ASG (mix de production d'électricité, durée de vie du bâtiment, choix de l'indicateur pour l'effet de serre et rendement du réseau d'eau) ont préalablement été identifiés par les deux autres méthodes. Ainsi, si l'objet d'une étude est de déterminer quels paramètres ont le plus d'influence sur les sorties, les méthodes d'ASL et le criblage de Morris, moins coûteuse en temps de calcul, peuvent suffire. En revanche, s'il est nécessaire de connaître plus précisément l'influence des facteurs incertains, une ASG doit être réalisée. Le temps de calcul de cette dernière méthode dépendant du nombre de paramètres incertains considérés. Le nombre de simulations étant multiplié par un facteur proche de $N_{tirage}/2$ (500, dans notre cas) par rapport à l'ASL, il est préférable d'effectuer un criblage de Morris ou une ASL en amont de l'ASG pour présélectionner les plus influents. L'analyse globale sera alors menée en excluant les facteurs peu influents pour un coût calculatoire réduit.

Pour un cas d'étude, bien documenté, comme celui-ci, de faibles variations sont considérées sur les paramètres d'entrée du modèle thermique et il est possible de faire une approximation de linéarité sur ceux-ci. Dans cette configuration, l'ASL permet en réalisant peu de simulations d'évaluer assez justement les effets des facteurs incertains. Pour des bâtiments moins bien connus, l'hypothèse de linéarité n'est plus valable. Il faut alors s'orienter vers des méthodes telles que le criblage de Morris pouvant capturer aussi l'effet des non-linéarités et des interactions sur les paramètres, mais $r/2$ (25, dans notre cas) fois plus coûteuse en nombre de simulation.

4. CONCLUSION

Trois méthodes d'analyse de sensibilité ont été mises en œuvre pour déterminer les paramètres les plus influents du modèle d'analyse de cycle de vie des bâtiments novaEQUER dans le cas d'une maison individuelle performante. La durée de vie du bâtiment, le type de mix de production d'électricité et des paramètres clés de la performance énergétique ont été identifiés comme particulièrement influents par toutes les méthodes. Même si la hiérarchie de ces entrées incertaines peut varier d'une analyse de sensibilité à l'autre, à cause de différences inhérentes aux méthodes, l'ASL et le criblage de Morris permettent d'identifier tous les facteurs ayant beaucoup d'influence, pour un coût calculatoire faible devant celui de l'ASG. Les caractéristiques du bâtiment étant bien connues dans ce travail, l'ASL offre ici le meilleur compromis coût calculatoire – précision. Cette étude sera poursuivie en considérant un plus grand nombre de facteurs incertains afin d'obtenir un classement de l'influence de tous les paramètres des outils d'analyse environnementale des bâtiments et des quartiers. Cela permettra de mieux comprendre les sources d'incertitudes et de progresser vers la fiabilisation des résultats d'ACV des ensembles bâtis.

Remerciements :

Ce travail a été supporté par la chaire VINCI-Paristech *Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Cabeza, Luisa F., Lúdia Rincón, Virginia Vilariño, Gabriel Pérez, et Albert Castell. 2014. « Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (janvier): 394-416. doi:10.1016/j.rser.2013.08.037.
- Frischknecht, Rolf, Niels Jungbluth, Hans-Jörg Althaus, Gabor Doka, Roberto Dones, Thomas Heck, Stefanie Hellweg, et al. 2007. « The Ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework ». *International Journal of Life Cycle Assessment*, 77.
- Heijungs, Reinout, et René Kleijn. 2001. « Numerical Approaches towards Life Cycle Interpretation Five Examples ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 6 (3): 141-48. doi:10.1007/BF02978732.
- Morris, Max D. 1991. « Factorial sampling plans for preliminary computational experiments ». *Technometrics* 33 (avril): 161-74. doi:10.2307/1269043.
- Munaretto, Fabio. 2014. « Etude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- NF EN ISO 14040. 2006. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes de cadre, 2006.
- Peuportier, Bruno, et 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. doi:10.1080/01425919008909714.
- Polster. 1995. « Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie ». Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- Popovici, Emil. 2005. « Contribution to the life cycle assessment of settlements ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Saltelli, Andrea, Karen Chan, et E. Marian Scott. 2000. *Sensitivity Analysis : Gauging the Worth of Scientific Models*. Vol. 134. Wiley.
- Sobol, I. 1993. « Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models ». *Sensitivity analysis for nonlinear mathematical models. Mathematical Modelling and Computational Experiment*, 407-14.
- Vorger, Eric. 2014. « Etude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.