

Analyse du Cycle de Vie des Quartiers : Effets de la Mutualisation des Systèmes de Production sur le Bilan Énergétique

Louis Bonnet

Polytech Tours, Département d'Aménagement et Environnement, 35 Allée Ferdinand de Lesseps, 37200 Tours

Avertissements

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement. L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Résumé

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) adaptée au secteur du bâtiment est aujourd'hui maîtrisée pleinement. Cependant, son intégration à une échelle territoriale peine à se développer car elle considère de nombreux facteurs difficilement quantifiables. Cette étude donne une première approche sur l'intégration des réseaux dans les calculs d'ACV à l'échelle d'un quartier. Ce rapport présente un modèle permettant d'estimer l'énergie grise nécessaire à la construction des systèmes de production d'énergie en fonction de leurs taux de mutualisation et de la morphologie urbaine. Ces résultats sont utilisés pour définir le coût énergétique d'une installation tout au long de sa durée de vie en permettant de déterminer une date optimale de fin de vie limitant sa consommation énergétique globale.

1 Introduction

1.1 L'Analyse du Cycle de Vie appliquée au secteur du bâtiment

Le secteur du bâtiment est l'un des plus consommateurs en énergie. En France, plus de 44% (68 Mtep/an) de l'énergie consommée est destinée aux secteurs résidentiel et tertiaire (ADEME, 2013). Cette consommation énergétique se traduit par la somme annuelle de l'énergie grise nécessaire à la

construction des bâtiments, l'énergie finale durant son utilisation et l'énergie grise des déconstructions.

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) permet de quantifier et d'anticiper tous les coûts énergétiques à l'échelle d'un bâtiment. Cette analyse prend en compte l'extraction des matières premières nécessaires à la conception de matériaux de construction, leur transport, l'assemblage ainsi que toutes les phases d'usages et de rénovations jusqu'au traitement en fin de vie des bâtiments. Parallèlement, l'ACV considère d'autres impacts sur l'environnement comme l'épuisement des

ressources, l'eutrophisation ou encore l'utilisation d'eau douce. Elle est définie dans la norme ISO 14040 par la « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie » (ISO, 2006). Afin de simplifier la modélisation, tous les indicateurs environnementaux ne seront pas explicitement traités, l'unité fonctionnelle utilisée sera l'énergie (Demande cumulative d'énergie – figure 1).

1.2 Cadre réglementaire

Indicateur environnemental	Unité	Référence
Demande cumulative d'énergie	GJ	(Frischknecht et al, 2004)
Eau utilisée	m ³	(Frischknecht et al, 2004)
Epuisement des ressources abiotiques	kg antimoine eq.	(Guinee et al, 2001)
Déchets produits	t	(Frischknecht et al, 2004)
Déchets radioactifs	dm ³	(Frischknecht et al, 2004)
Effet de serre (100 ans)	t CO ₂ eq.	(Guinee et al, 2001)
Acidification	kg SO ₂ eq.	(Guinee et al, 2001)
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq.	(Guinee et al, 2001)
Domage à la qualité des écosystèmes dus à l'écotoxicité	PDF*m ²	(Goedkoop et Spriensma, 2000)
Domage à la santé	DALY.	(Goedkoop et Spriensma, 2000)
Production d'ozone photochimique	kg C ₂ H ₄ eq.	(Guinee et al, 2001)
Odeur	m ³ air	(Guinee et al, 2001)

Figure 1 Les indicateurs environnementaux - Peuportier et al. 2006

Dans un contexte de sobriété énergétique, l'ACV est un outil ayant des enjeux scientifiques importants mais qui répond aussi à une demande du marché visant à l'élaboration de projet plus soucieux du développement durable. D'un point de vue réglementaire, ce volet tend à être de plus en plus considéré avec des exigences en terme de qualité thermique du bâtiment ou dans la composition des matériaux via le développement de filières locales d'« éco-matériaux » par exemple. Actuellement, la réglementation n'impose pas d'ACV, les performances des bâtiments neufs sont régies par la réglementation RT2012. Pour les bâtiments existants, la RT2007/2008 est appliquée. La prochaine réglementation thermique RE2020 imposera aux bâtiments neufs d'être à énergie positive sans pour autant que la réalisation d'une d'ACV soit nécessaire. Les labels utilisent quant à eux des indicateurs plus poussés en termes de consommation d'énergies renouvelables (ENR) et de production comme la labélisation BEPOS¹ (E+C-, 2016). Néanmoins, certains labels comme HQE, BBCA, Effinergie, E+C-, DGNB, BREEAM et LEEDS² imposent aux maitres d'ouvrages la réalisation d'une ACV. Actuellement ces études sont réalisées à l'échelle du bâtiment (Peuportier B., 2001). Elles traitent essentiellement des produits de construction (FDES, PEP, EPD)³ et de l'utilisation des bâtiments en intégrant de nombreux aspects environnementaux (Figure 1). A une échelle urbaine, les modèles de calculs sont ne sont pas encore fiables pour une utilisation réglementaire. Cependant, la modélisation à une telle échelle permettrait d'obtenir un outil renforçant les liens entre la conception urbaine, architecturale et technique (Peuportier B., 2006).

1.3 Objectif de l'étude

« Le bilan environnemental d'un quartier n'est pas simplement la somme des bilans des différents bâtiments qui le composent. D'une part, il faut tenir compte des interactions entre bâtiments, par exemple les masques solaires sur les différentes façades en fonction de la morphologie urbaine. D'autre part, certains équipements, comme une chaufferie alimentant un réseau de chaleur, peuvent être mutualisés. »
(Colombert, M et al, 2011)

Nous cherchons ici à formuler une hypothèse sur un fait réel et tout l'effort sera de la réfuter ou de la valider par des observations empiriques. Si cette hypothèse est fautive, la modélisation de l'ACV à l'échelle d'un quartier n'en sera que plus simple et les modèles existants à l'échelle d'un bâtiment seront adéquats pour son calcul, comme par exemple : PLEIADES, SimaPro ou openLCA.

Hypothèse : L'ACV énergétique à l'échelle d'un quartier ne peut pas se résumer à la somme des ACV de chaque bâtiment car elle doit considérer la mutualisation des systèmes énergétiques.

Un ensemble urbain étant très difficilement modélisable dans sa globalité, l'étude porte sur l'importance de la mutualisation via les réseaux dans le calcul de l'ACV. Cette analyse étant accès sur une comparaison d'échelle, il est important d'étudier la sensibilité des résultats et l'impact réel qu'ils ont à l'échelle urbaine. Techniquement, cela signifie qu'il faudra confronter le modèle urbain au modèle appliqué aux bâtiments afin de valider ou de réfuter cette hypothèse.

L'unité d'étude utilisée est l'énergie, l'énergie de consommation est calculée en énergie primaire et l'énergie grise est définie comme l'énergie nécessaire à l'élaboration d'un produit (Cornillier, 2008). De ce fait, l'énergie grise ne considère pas l'énergie contenue dans les matériaux pouvant être revalorisés. Par exemple pour du bois l'énergie « procédé » non renouvelable est de 3,5 MJ/kg mais l'énergie contenue dans le matériau est de 18MJ/kg. Ne pas tenir compte de cette énergie revient à admettre que lors de sa déconstruction l'équipement est à minima revalorisé énergétiquement.

2 Modélisation énergétique d'un quartier

Dans le cadre de notre étude, le modèle permettant de calculer les besoins en énergie finale d'un quartier ne sera pas développé. Ces besoins seront calculés à l'aide du module Typologie Energie de Toaster Intégral. Ce module permet d'analyser les besoins dynamiques d'un quartier en tenant compte des dynamiques environnementales et des évolutions dans les caractéristiques des enveloppes des bâtiments.

2.1 Dynamique des consommations énergétiques : la dégradation des rendements

La majorité des équipements énergétiques sont enclins à une diminution de leurs performances au fil du temps. En effet, un panneau solaire voit son rendement diminuer années après années et une batterie stocke une charge moins importante après de nombreux cycles.

L'augmentation de la consommation d'une installation est liée à la diminution de son rendement. Cependant, certains systèmes ne fonctionnent pas toujours à leur puissance nominale, comme c'est le cas pour les systèmes de chauffage. Il est donc intéressant d'analyser dans quelle proportion la puissance réelle d'utilisation d'un équipement affecte son rendement. Le modèle suivant permet d'obtenir un rendement effectif considérant les besoins dynamiques au cours d'une année.

ρ_t : rendement réel dynamique

$$\rho_t = \rho + \log(C)$$

$$\rho_t = 0.5 + \frac{\rho_t - \min(\rho_t)}{\max(\rho_t) - \min(\rho_t)} * (\rho - 0.5)$$

avec ρ : rendement optimal chaque années et C : Besoins annuels en MW

ρ_{ho} : rendement effectif de l'équipement

$$\rho_{ho} = \frac{\sum C}{\sum \rho_t}$$

La figure ci-dessous permet d'estimer l'impact qu'a cette variation sur la diminution du rendement au cours du temps.

1 BEPOS : Bâtiment à énergie positive

2 HQE : haute qualité environnementale, BBCA : Bâtiment bas carbone, DGNB : Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, BREEAM : Building Research Establishment Environmental Assessment Method, LEEDS : Leadership in Energy and Environmental Design

3 Ce type de documents est consultable sur Inies, <https://www.inies.fr/accueil/>

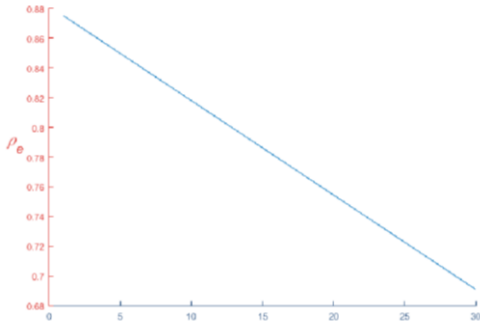


Figure 2 Rendement effectif de l'équipement par années

La puissance réelle d'utilisation est responsable au maximum de 11% de la diminution de rendement dans le cas le plus défavorable (une seule source répond à tous les besoins), ce qui n'est pas négligeable. Cependant pour un réseau connexe ayant plusieurs sources répondant à différents pics de consommation, cette différence diminuera (Annexe 1,2).

2.2 Effets de la mutualisation des systèmes de production

2.2.1 Coût énergétique des unités de production

L'économie d'échelle dans la construction des machines signifie que la somme des coûts énergétiques des systèmes d'un réseau totalement décentralisé (une chaudière par foyer) sera supérieure au coût d'une seule centrale alimentant toute une ville.

Partant de ce principe nous pouvons estimer qu'il existe un nombre d'unités intermédiaires, à l'échelle du quartier, permettant de limiter le coût énergétique pour chaque individu. Afin de simplifier le modèle, l'évolution de ce coût suit une courbe sigmoïde :

$$Ei = \frac{e^{\alpha E}}{1 + e^{\alpha E}} \quad \forall E \in \{-1; 1\}$$

avec
 α : un paramètre variable

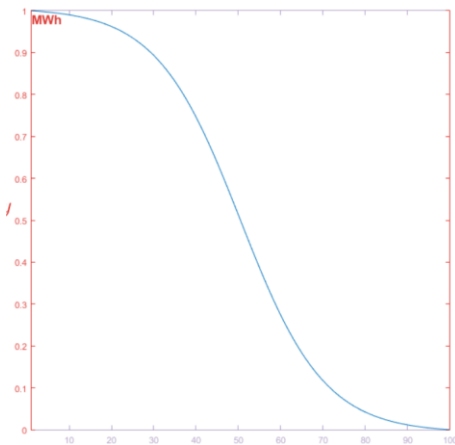


Figure 3 Coût normalisé en fonction du taux de décentralisation

Dans son application cette courbe admet comme bornes de E_i :

$E_{i\min}$ = Coût d'une chaudière individuelle

$E_{i\max}$ = Coût d'une centrale alimentant tout le réseau

L'estimation du coût généralisé (EG) s'obtient par le produit du nombre d'équipements (N) et de leurs coûts (E_i). Le taux de décentralisation optimal (EGo) représente donc celui pour lequel l'énergie totale sera minimale.

$$EGo = \min(Ei * N)$$

Sans tenir compte de la topologie du réseau ce résultat est minimal pour un réseau totalement centralisé.

2.2.2 Coût énergétique des réseaux

Le coût total d'un réseau ne se résume pas à la somme du coût de construction des sources énergétiques, il faut à cela y ajouter le coût de fabrication du réseau de distribution. En considérant l'ACV d'un point de vue « matériaux », l'étude se focalise sur le coût de construction des équipements, dans ce cas, ce sont les tuyaux. Ainsi, le coût énergétique dépend directement de la distance totale du réseau.

En se basant sur un réseau robuste purement aléatoire, défini par une triangulation de Delaunay, il est possible de définir une évolution théorique de la distance totale du réseau en fonction du taux de mutualisation. Les réseaux tracés sont les plus courts chemins entre une origine et ses destinations les plus proches (calculé via l'algorithme de Dijkstra). Ces réseaux arborescents, représentant les mutualisations, ne sont pas connectés.

L'algorithme utilisé pour calculer le plus court chemin, se basant sur l'algorithme de Dijkstra, est « polyradial » développé par Mindjid Maizia (Annexe 3)

Entrées : D avec D: densité ($\frac{\text{batiments}}{\text{km}^2}$)
 $x = D * \text{ nombres aléatoires compris entre } 0 \text{ et } 1$
 $y = D * \text{ nombres aléatoires compris entre } 0 \text{ et } 1$

$A = \text{delaunay}(x, y)$

Pour i allant de 1 à D

$K(i) = i$

$Q = \text{polyradial}(x, y, A, K)$

Fin Pour

$d = \sum \text{distance euclidienne}(Q_{xy})$

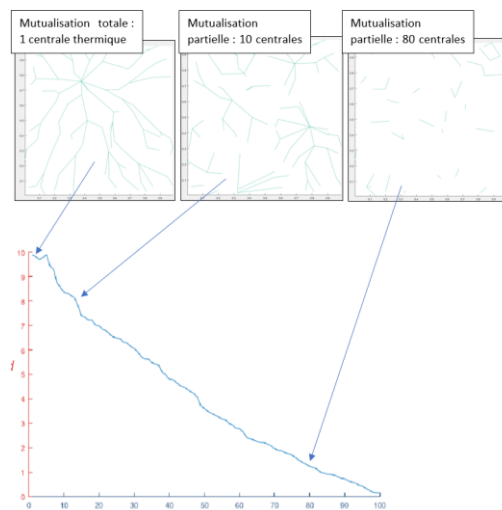


Figure 4 Evolution de la distance totale du réseau en fonction du nombre de sources énergétiques pour 100 bâtiments / km²

Cette première itération (Figure 4) démontre que la distance totale du réseau suit une régression dépendant du taux de décentralisation. Ce modèle permet notamment d'analyser des zones plus ou moins denses de manière théorique. En effet, il suffit de générer un plus grand nombre de points aléatoires (bâtiments) sur un ensemble de définitions [0 ; 1] pour obtenir des variations de distance, cependant l'allure de la courbe reste identique. Dans la figure ci-dessus 100

points ont été générés sur une surface de 1 km². Afin d'affiner le résultat il est nécessaire de réaliser un grand nombre d'itérations de ce calcul.

En s'appuyant sur les valeurs obtenues après de nombreuses itérations il est possible d'estimer une équation théorique de la régression suivie par la distance.

Entrées : N, d N = nombre de noeuds (permet l'extrapolation) et d = distance

linéarisation de d
 $y = \log(d)$

Calcul des coefficient d'un polynome d'ordre 1 (Inteprolation polynomiale)
 $e = \text{polyfit}(n, y, 1)$

Courbe de régréssion
 $D = \text{polyval}(e, N)$
 $D = \exp(D)$

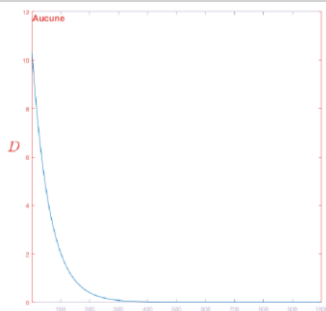


Figure 5 Extrapolation de la relation théorique pour 1000 bâtiments/ km²

En extrapolant une loi générale sur la régression de cette distance il est maintenant possible de calculer un optimum combinant les deux approches pour des densités différentes (maximisant l'économie d'échelle et minimisant le coût total du réseau).

2.2.3 Optimisation de la mutualisation en fonction de la densité urbaine

Afin d'obtenir une valeur optimale pour un réseau le moins coûteux en énergie grise il suffit de sommer les deux courbes (Figures 3 et 5) et de déterminer le minimum. Cet optimum définit le meilleur taux de mutualisation possible appliqué à une certaine morphologie urbaine. La variable « densité » permet de modéliser ces différentes morphologies. Si le réseau n'est pas considéré, l'optimum est une centralisation totale. Cependant, en considérant un réseau avec une densité très élevée, une décentralisation totale est préférable d'un point de vue énergétique (Figure 6).

$$Et = Er + Ei * Tc$$

avec Er : Energie grise du réseau,
 Ei : Energie grise des infrastructures,
 Tc : Taux de centralisation

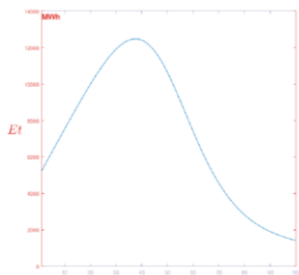


Figure 6 Energie grise totale en fonction du taux de décentralisation dans un milieu très peu dense

La figure ci-dessus permet d'obtenir un optimum en coût énergétique général. Cependant en ramenant ce coût au nombre d'habitants il est possible d'estimer la relation qu'induit la mutualisation sur les dépenses énergétiques de chaque usager. Le dérivé de cette relation permet notamment de définir quel taux de mutualisation est optimale d'un point de vue purement individuel.

$$\text{Optimum} = \frac{d\left(\frac{Et}{np * Tc}\right)}{d(Tc)} = -1$$

avec np : nombre d'habitants,
 Et : énergie grise totale, Tc : taux de centralisation

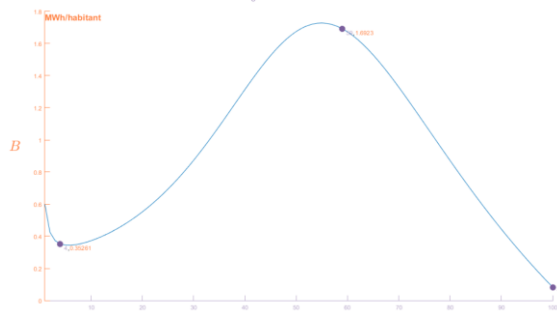


Figure 7 Coût énergétique par habitants en fonction de la décentralisation

La figure ci-dessus démontre qu'il existe plusieurs optimums pour les habitants, soit la centralisation est peu importante et l'optimum sera d'environ 4% soit elle est très importante et l'optimum sera une centralisation de 100%.

2.3 Etude du cycle de vie du réseau

De manière générale les consommateurs cherchent à augmenter la durée de vie d'un équipement en le gardant le plus longtemps possible. Cependant lorsqu'on regarde le bilan énergétique sur l'ensemble du cycle de vie d'un équipement il faut tenir compte de la diminution de son efficacité. En effet dans le cas d'un système de chauffage le rendement de l'équipement diminuera au cours des années (Figure 2). La plupart des études commerciales considère une durée de vie moyenne dans leur calcul (EVEA, 2016). Cependant il serait intéressant de déterminer quelle durée de vie serait optimale en énergie primaire totale, sans tenir compte des potentielles réparations. Le résultat de calcul permet de comparer l'obsolescence optimale, d'un point de vue énergétique, au l'obsolescence réelle des équipements.

Durée de vie (années)	
Fioul	23
Propane	20
Granulés	20
Poêle	30
PAC	20

Figure 8 Durée de vie des équipements de chauffage- EVEA/Butagaz

Ce modèle considère que le coût en énergie grise d'un équipement se répartie équitablement sur toute sa durée de vie. De plus l'énergie consommée dépend du rendement de l'équipement décroissant et linéaire (Figure 2)

Entrées: t, ρ, Ef, C, α

avec
 t : période d'analyse (an),
 ρ : rendement effectif de la chaudière,
 C : Cout en énergie grise d'une chaudière (MWh),
 Ep : Besoins en énergie finale $\left(\frac{MWh}{an}\right)$.

α : dégradation du rendement annuel ($\frac{\%}{\text{an}}$)

Rendement dynamique

$$\rho_t = \rho - \alpha * t$$

Coût en énergie grise dynamique du système de chauffage

$$Eg_t = Cc/t$$

Consommation en énergie primaire

$$Ep_t = \frac{Ef}{\rho_t}$$

Consommation énergétique totale

$$C_t = Ep_t + Eg_t$$

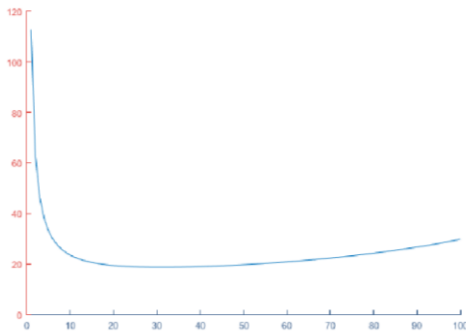


Figure 9 Evolution du coût énergétique d'une installation annuellement

La durée de vie optimal d'un équipement sera donc la date à laquelle cette courbe admet son minimum. L'énergie totale consommé sur cette période sera donc :

$$Et = \int_0^T Ep_t \cdot dt + Eg_t(T) * T$$

3 Application à deux quartiers

Afin de d'analyser la variation de ces indicateurs en fonction de la morphologie urbaine, l'étude sera appliqué à deux quartiers de densité différente. L'un sera représentatif d'un quartier d'agglomération française assez dense (1km² du quartier Varenne à Tours-Annexe 5). L'autre sera représentatif d'une zone rurale Française (1km² dans la commune de Truyes – Annexe 5). Les bâtiments étudiés seront divisés en 5 classes définies par la performance thermique de leur enveloppe, dépendant directement de l'année de construction. Les variables utilisées dans cette modélisation sont les plus influentes en termes de sensibilité sur la consommation du quartier : occupation des bâtiments, climat, ventilation, isolation. (Pannier M.L., 2018)

4 Résultats

4.1 Besoins en énergie finale

Variables clés :

Umur : Conductance des murs en W/m²K

Uvitr : Conductance du vitrage en W/m²K

Utoit : Conductance de la toiture en W/m²K

Ftoit : Facteur de surface du toit par rapport à un sol plat

Tx vitr : Taux de vitrage en %

FS vitrage : Facteur solaire du vitrage (part du rayonnement qui sera transmis sous forme de chaleur) en %

Nv air : Taux de renouvellement d'air en vol/h

Inertie : Coefficient d'inertie

Apport interne : Apports internes kWh/m²an

Ces variables clés sont les principales permettant d'avoir un modèle simplifié. Les dynamiques météorologiques ne sont pas prises en compte, seul la température et le rayonnement solaire ont ici un impact sur les besoins climatiques des bâtiments.

La dynamique d'occupation des bâtiments permet d'étudier plus finement la température intérieure de confort. A l'aide de l'outil Toaster Intégral, la consommation du quartier et calculé en tenant compte des paramètres suivants :

Année de construction	Umur	Uvitr	Utoit	ftoit	Tx vitr	FS vitrage	nv air	Inertie	Apport interne
Avant 1982	1,8	2,8	1,8	1	0,3	0,65	0,5	2,9	22,9
1982-1989	1,15	2,8	1,15	1	0,3	0,65	0,5	2,9	22,9
1989-2000	0,65	1,2	0,65	1	0,3	0,65	0,4	2,9	22,9
2000-2009	0,65	1,2	0,65	1	0,3	0,6	0,4	2,9	22,9
2009-2020	0,5	1,2	0,5	1	0,3	0,6	0,4	2,9	22,9

Figure 10 Principales caractéristiques thermiques

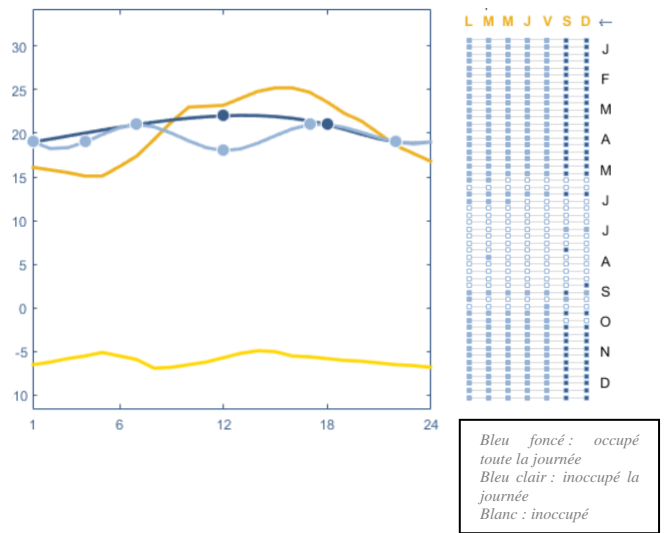


Figure 11 Courbe des températures intérieures en fonction des heures

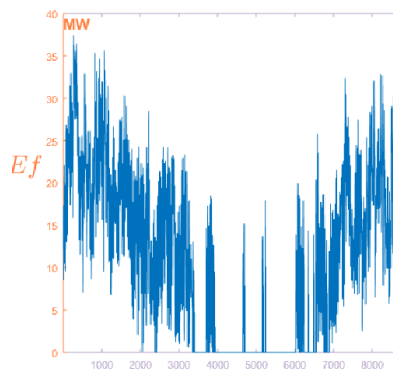


Figure 12 Besoins thermiques annuels du quartier Varennes

Besoins annuels de la zone dense (quartier varennes) : **94,2 GWh/an**

Besoins annuels de la zone rurale (Truyes) : **637 MWh/an**

Ces résultats annuels seront utiles au calcul de la date de fin de vie des équipements. Ces résultats sont uniquement basés sur les besoins thermiques des bâtiments, cependant, la modèle utilisé ultérieurement peut s'appliquer aux besoins en électricité ou en eau courant par exemple, seules les valeurs changent.

4.2 Taux de mutualisation optimale

Dans cette application nous considérons que l'énergie grise nécessaire à la construction d'un réseau dépend directement de la masse des matériaux utilisés.

Ne pas considérer l'énergie de procédé nécessaire aux travaux permet de mettre en exergue l'importance de l'énergie grise d'un point de vue « matière ».

Un réseau de distribution est composé de segments de capacités différentes (diamètres) ayant donc des énergies grises variables (annexe 4). Concrètement, le diamètre moyen du réseau évolue proportionnellement au taux de mutualisation. L'objectif de cette étude est d'avoir un ordre de grandeur de la variation en fonction de la distance du réseau et non de son diamètre. La valeur moyenne étant variable dans notre étude nous utiliserons une énergie grise de **15 kWh/ml**, multiplié par deux (aller/retour)

Les données pour une centrale thermique étant difficilement trouvable nous utiliserons les besoins surfaciques pour un bâtiments tertiaire (ministère de l'environnement, 2018)

Eimin : Chaudière de 15 kW, **600kWh** (Uniclimate, 2018) ⁴

Eimax : centrale de 40MW, 170 MJ/m² soit environ **330MW** pour une centrale de 7000m² (production totalement centralisé)

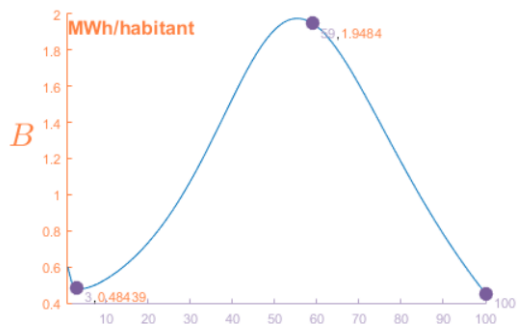


Figure 13 Coût énergétique par habitants en zone dense

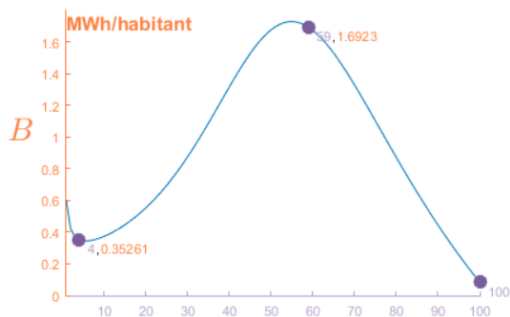


Figure 14 Coût énergétique par habitant en zone rurale

Taux de centralisation optimal :

Zone dense : **3%**

Zone rurale : **4%**

La différence de taux de centralisation n'est que de 1% cela démontre que la forme et la longueur du réseau à un effet très limité sur l'énergie grise nécessaire à sa construction. Le taux de mutualisation le plus intéressant peut donc se résumer au nombre d'unités de productions à implanter. Cependant l'évolution du coût des machines suit une sigmoïde qui n'est pas forcément la plus représentative de la réalité et limite surement le taux de mutualisation en le faisant tendre vers une décentralisation totale.

Indépendamment du taux de mutualisation, il est important d'analyser l'impact énergétique du réseau en valeur absolue. En moyenne le réseau à un coût **12,5 %** plus important dans la zone dense que dans une zone rurale. Cela n'est pas négligeable et permet de démontrer que l'ACV à l'échelle territoriale doit considérer l'effet des réseaux dans l'étude d'impact en énergie grises.

4.3 Cycle de vie du réseau

Le calcul de la date de fin de vie dépend forcément du taux de mutualisation car il représente l'amortissement du coût total en énergie grise et énergie finale. En considérant que la mutualisation est proche de l'optimum, avec une population de 21 000 habitants pour la zone dense et 2300 habitants sur la zone rurale. Le modèle d'optimisation du cycle de vie (partie 2.3) peut être appliqué, afin de définir une durée de vie optimale pour les équipements de chauffage (annexe 6 et 7).

Durée de vie, zone dense : **5 ans**

Durée de vie, zone rurale : **13 ans**

Cette première approximation de la durée de vie est inférieure à la durée de vie moyenne des équipements (Figure 8). Cela prouve que le coût en énergie grise des équipements à moins d'importance sur l'optimisation du cycle de vie que la diminution du rendement au cours du temps. De plus dans cette étude il est admis que le taux de mutualisation est à son optimum ce qui est rarement le cas. La durée de vie réelle des équipements dépend aussi d'autres facteurs comme le prix, ou la solidité qui ne sont pas pris en compte ici. Concrètement, ce résultat permet de démontrer qu'il n'est pas toujours nécessaire de conserver un équipement le plus longtemps possible et qu'il existe une date intermédiaire prenant en compte la diminution d'efficacité du système. Il est important de nuancer ce résultat car les données utilisées pour ces calculs ne sont pas forcément les plus représentatives de la réalité car elles admettent de nombreuses approximations. Ce calcul est plutôt destiné à représenter l'allure suivie par ces dynamiques.

5 Conclusion

Cette approche de la modélisation de l'ACV à l'échelle du quartier permet de mettre en exergue l'importance des réseaux dans le calcul en énergie grise. En se focalisant sur la longueur totale du réseau et le coût des équipements ce modèle démontre la faible importance de la densité urbaine sur le taux de mutualisation des systèmes énergétiques. Cependant, même en omettant l'énergie nécessaire aux travaux, cette étude démontre que le coût total énergétique n'est pas négligeable avec une variation de 12,5% entre les deux zones. De plus, en négligeant de nombreux facteurs sur la durée de vie des équipements, l'étude a permis de démontrer que l'énergie grise est très peu représentative de la durée de vie réelle tout en prouvant que la dégradation de l'efficacité d'un système a un effet important sur l'optimisation de son cycle de vie.

Afin d'améliorer ce modèle il serait intéressant de déterminer plus précisément la variation du rendement ainsi que l'évolution du coût réel des systèmes énergétiques. Il serait aussi légitime de considérer le coût des travaux et des rénovations qui auront un impact important sur le bilan énergétique des réseaux. Pour finir, afin de rendre l'étude plus concrète, il faudrait utiliser un réseau réel plutôt qu'un réseau fictif ne dépendant que de la densité. Ainsi les résultats obtenus seraient plus pertinents pour les lieux d'études mais moins facilement extrapolable pour des morphologies urbaines différentes.

⁴ . Les données utilisées proviennent de la base INIES (<https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html>)

6 Bibliographie

ADEME, 2013, *Chiffres clés du bâtiment*, [en ligne]. [Consulté le 11.11.19]. Disponible sur : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-batiment-edition-2013-8123.pdf>

Colombert M., de Chastenet C., Diab Y., Gobin C., Herfray G., Jarrin T., Peuportier B., Tardieu C. & Trocmé, M., 2011. *Analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier : un outil d'aide à la décision ? Le cas de la ZAC Claude Bernard à Paris (France)*. Environnement urbain, 5, c1-c21. <https://doi.org/10.7202/1007605ar>

Cornillier C., Vial E., 2008, *L'analyse de Cycle de Vie (ACV) appliquée aux produits bois : bilan énergétique et prise en compte du carbone biomasse FCBA*

EVEA, 2016, *ACV comparative propane vs fioul pour application chauffage domestique*

International Organization for Standardization, 2006, *ISO 14044:2006(fr)*, [en ligne]. [Consulté le 21.11.19]. Disponible sur : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:fr>

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER - MINISTERE DU LOGEMENT ET DE L'HABITAT, 2018, *DURABLE Lot forfaitaire – Lot 9 – Bâtiment tertiaire – Installations sanitaires - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE*

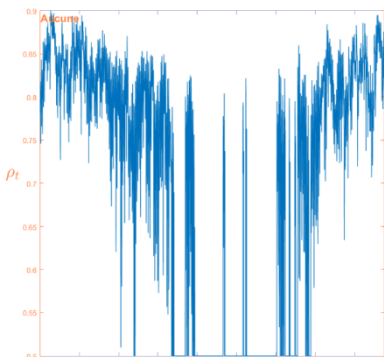
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER MINISTÈRE DU LOGEMENT ET DE L'HABITAT DURABLE, Référentiel « Energie-Carbone » pour les bâtiments neufs [en ligne]. [Consulté le 11.11.19]. Disponible sur : <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-27814-referentiel-label-energie-carbone-methode.pdf>

Pannier M.L., Schalbart P., Peuportier B., 2018, *Comprehensive assessment of sensitivity analysis methods for the identification of influential factors in building life cycle assessment*, MINES ParisTech, PSL Research University, CES e Centre d'efficacité énergétique des systèmes, 60 Bd St Michel, 75006, Paris, France. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.070>

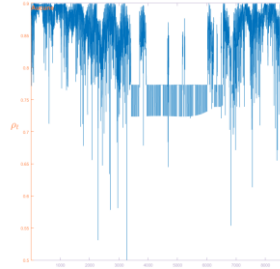
Peuportier B., Popovici E., Trocmé M., 2006, *Analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier*

Uniclima, 2018, *Profil Environnemental Produit Collectif Chaudière à condensation gaz individuelle mixte*, UNIC-00021-V01.01-FR

7 Annexes



Annexe 1 Evolution du rendement sur une année, sans ordonnancement



Annexe 2 Evolution du rendement sur une année, avec ordonnancement

Le gain en rendement provient ici d'un calcul prenant en compte deux sources d'énergie fatale prioritaires sur le réseau : récupération de chaleur industrielle (2MW), centrale solaire thermique (0,9MW). La perte en rendement est ici de 2% contre 11% avec une seule chaudière.

```
x=x(:);
y=y(:);
A=[];D=[];md=[];
for i=1:numel(varargin)
a=varargin{i};
switch 1
case ischar(a)
md=a;
case numel(a)==length(a) && isa(a,'double')
D=a;
case size(a,1)==numel(x) && size(a,2)==numel(y) &&
isa(a,'double')
A=a;
end
end
if isempty(D) || isempty(A)
tri=delaunay(x,y);
end
if isempty(D)
xi=x(tri);yi=y(tri);
a=(polyarea(xi',yi'))';
xm=mean(xi,2);
ym=mean(yi,2);
xm=sum(a.*xm)/sum(a);
ym=sum(a.*ym)/sum(a);
[dx,y,D]=min((x-xm).^2+(y-ym).^2);
end
if isempty(A)
n=numel(x);A=zeros(n);
I=tri(:);J=tri(:,[2 3 1]);J=J(:);
IJ=I+n*(J-1);A(IJ)=1;
end
[cts,pth]=dijkstra(A,[x y],D);
if numel(D)>1
[c,k]=min(cts);
else
k=ones(size(pth));
end
id=[];
pthi=cell(size(k));
cpt=1;
for i=1:size(pth,2)
p=pth{k(i),i};
p=p(:);
p=[p(1:end-1) p(2:end)];
if ~isempty(p) && size(p,2)==2;
pthi{cpt}=p;
cpt=cpt+1;
end
end
if cpt<numel(k)
pthi{cpt:end}=[];
end
arc=cell2mat(pthi{:});
arc=unique(arc,'rows');
if strcmp(md,'connected')
a=who;
```

```

U=arc(:);
u=histc(U,1:max(U));
U=1:max(U);
u=U(u==1);
[i,j]=find(A==1);
ij=[i j];
id=sum(ismember(ij,u),2)==2;
arc=[arc;ij(id,:)];
end
    
```

Copyright : Mindjid Maïzia - PolyTech Tours - 2016

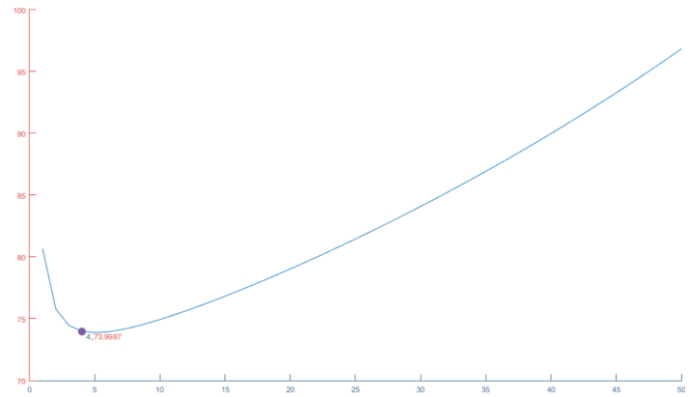
Annexe 2 Code de : polyradial (MATLAB)

valeur par paire de tuyau									
Débit considéré pour une vitesse moyenne de 1m/s	DN	perte énergie réseau classique	perte énergie réseau sur isolé	gain énergie due à la sur isolation		énergie grise PUR nécessaire	temps de retour énergie grise	% de perte réseau classique pour 1 branche de 200 m	% de perte réseau surisolé pour 1 branche de 200 m
				kWh/m/an	%				
2.39	25	127	105	21	17%	5,9	0,3	21,7%	16,0%
3.91	32	129	114	15	11%	5,3	0,4	13,5%	12,0%
8.40	50	165	144	21	13%	6,0	0,3	9,0%	7,0%
13.97	65	193	160	32	17%	9,0	0,3	5,6%	4,7%
19.24	80	198	168	31	15%	10,3	0,3	4,2%	3,6%
29.42	100	206	174	32	16%	15,8	0,5	2,9%	2,4%
44.18	125	271	185	87	32%	33,7	0,4	2,5%	1,7%
49.04	130	237	199	39	16%	18,0	0,5	2,0%	1,7%
63.62	150	276	225	52	19%	22,8	0,4	1,8%	1,4%
121.50	200	301	237	64	21%	39,7	0,6	1,0%	0,8%
				moyenne :	18%		0,4		

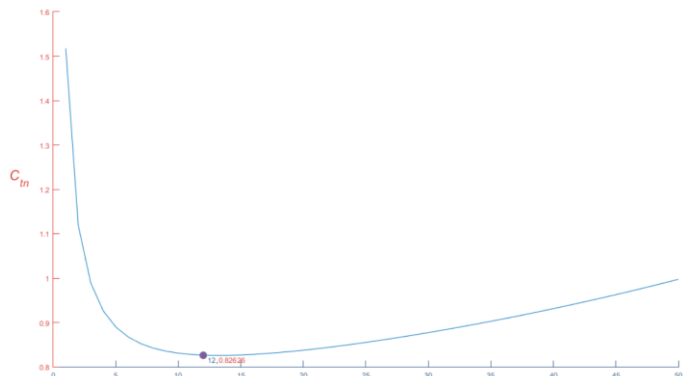
Annexe 3 Energie grise nécessaire à la construction des réseaux en fonction de leur diamètre- RCT 34 2011, Indiggo



Annexe 4 Les zones d'études



Annexe 5 Optimisation de la durée de vie du réseau et de ses unités de production en zone dense



Annexe 6 Optimisation de la durée de vie du réseau et de ses unités de production en zone rurale