

Projet de Fin d'Etudes

**Gisements biomasse à l'échelle
urbaine : modélisation et
optimisation des réseaux de
chauffage urbain**



2009-2010

Directeur de recherche

M. Mindjid Maïzia

Besson Amélie

Dekeyser Olivier

Hennebert Audrey

Laurence François-Xavier

Métairie Simon

Thinon Antoine

**Gisements biomasse à l'échelle
urbaine : modélisation et
optimisation des réseaux de
chauffage urbain**

Besson Amélie

Dekeyser Olivier

Hennebert Audrey

Laurence François-Xavier

Métairie Simon

Thinon Antoine

2009-2010

Directeur de recherche

M. Mindjid Maïzia

AVERTISSEMENT

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.

Les auteurs de cette recherche ont signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

FORMATION PAR LA RECHERCHE ET PROJET DE FIN D'ETUDES

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, 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 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 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 Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 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 tout une 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.

REMERCIEMENTS

Notre reconnaissance va à toutes les personnes qui nous ont encadrées, suivies et soutenues lors de la réalisation de ce projet de recherche.

A cet effet, nous remercions tout particulièrement M. Mindjid Maïzia, tuteur de ce projet et professeur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Tours qui a su nous guider pas à pas dans l'élaboration de ce projet et nous a initié à la réalisation d'un mémoire de recherche.

Nous remercions pour leurs conseils et leurs aides :

- M. Larribe Sébastien, maitre de conférences à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Tours

- M. Philippe Marc-André, maitre de conférences à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Tours

- Mme Polombo Nadine, maitre de conférences à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Tours

- M. Serrhini Kamal, maitre de conférences à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Tours

- M. Palka Gaëtan, élève à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Tours

Nous remercions également nos proches pour le soutien moral dont ils nous ont fait part.

SOMMAIRE

Introduction	9
Partie 1.....	14
Elaboration du modele theorique.....	14
1. Les réseaux de collecte et de distribution.....	15
1.1 Des graphes comme les autres.....	15
1.2 Construction du réseau de collecte et de distribution pour un traitement par SIG	16
1.3 La simplification du réseau au regard de la spécificité urbaine.....	18
1.4 La topologie des réseaux	19
2. Estimation des besoins de chauffage à l'échelle urbaine : la demande en énergie..	
2.1 Période de chauffe et degrés-heures	21
2.2 Les déperditions par l'enveloppe.....	22
2.3 Les déperditions par la ventilation	24
2.4 Les apports internes.....	25
2.5 Les apports solaires	25
2.6 Bilan	29
3. L'offre matière	30
3.1 L'offre bois.....	30
3.2 Méthanisation	37
3.3 Offre récupération de la chaleur des eaux usées :	41
4. Choix d'un indicateur de rentabilité des réseaux de distribution de chaleur.....	45
4.1 La densité thermique	45
4.2 Seuils de rentabilité	46
Partie 2.....	47
Mise en œuvre opérationnelle de l'outil.....	47
1. Les avantages d'une modélisation en SIG.....	48
1.1 L'utilisation d'un SIG dans une modélisation énergétique territorialisée	48
1.2 La production et la représentation des données par une modélisation sous SIG	51
2. La structuration de la base de données spatialisée	52
2.1 Objectifs de la partie.....	52
2.2 Base de données répondant à la question de la demande en énergie.....	53
2.3 Base de données répondant à la question de l'offre en énergie.....	62
2.4 Vers une automatisation de la production cartographique ?.....	71
2.5 Conclusion.....	71
3. Le réseau de distribution et de collecte des déchets	72
3.1 Création de la matrice des chemins minimaux.....	72
3.2 Méthode de simplification pour la distribution de chaleur et la collecte des déchets et des eaux usées.....	74
4. Le modèle de reconstitution de la demande	76
5. Le modèle relatif à l'offre énergétique.....	78
5.1 L'offre bois.....	78
5.2 L'offre méthanisation	81
5.3 L'offre récupération chaleur des eaux usées	84
6. La rentabilité du réseau	86
6.1 Rentabilité globale sur SIG	86
6.2 Rentabilité locale à l'aide d'un outil de calcul matriciel.....	87
Partie 3.....	88
Application à un cas d'étude et scénarios prospectifs : le Noyau Urbain de Tours	88
1. Le contexte de la demande énergétique du Noyau Urbain de Tours.....	90
1.1 Le parc de logement	90
1.2 La construction du réseau de distribution et de collecte.....	96
1.3 Les besoins d'énergie : application au cas du Noyau Urbain de Tours.....	99
1.4 L'offre bois.....	103
1.5 L'offre méthanisation	112
1.6 L'offre eaux usées	131

1.7 Mise en place des réseaux de chaleur.....	140
1.8 Mise en place d'indicateurs de comparaison des scénarios.....	147
2. Scénarios et perspectives.....	148
2.1 Modification d'un seul paramètre	149
2.2 Scénarios combinés	164
2.3 Bilan des scénarios	171
Conclusion.....	172
Bibliographie.....	178
Table des figures	180
Table des Cartes	184
Annexes.....	186

INTRODUCTION

L'Homme a sans cesse transformé son environnement en fonction de ses besoins. Ces trente dernières années, la croissance démographique et économique a bouleversé la surface de la Terre de manière irréversible. En effet, depuis 1750, la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmenté de 30% et celle du méthane de 150%. Ces Gaz à Effet de Serre (GES) ont un impact direct sur le changement climatique, un phénomène mesuré et dont les répercussions peuvent être importantes. La température moyenne de la surface de la Terre a augmenté de 0.6 °C au cours du XXème siècle avec les effets néfastes que l'on connaît sur la biodiversité.

Le Sommet de la Terre, à Rio en 1992, a marqué la prise de conscience internationale des risques liés au changement climatique. Les états les plus riches, pour lesquels une baisse de croissance semblait plus supportable et qui étaient en outre responsables des émissions les plus importantes, y avaient pris l'engagement de stabiliser en 2000 leurs émissions par rapport à 1990. C'est le Protocole de Kyoto, en 1997, qui a traduit en engagements quantitatifs juridiquement contraignants cette volonté. Par la suite, la loi POPE (juillet 2005) et le Grenelle 1 de l'environnement (juillet 2007) établissent d'autres engagements chiffrés tels que le Facteur 4 qui consiste à diviser par quatre les émissions de GES d'ici 2050 ou la baisse de la TVA à 5,5% pour les collectivités s'impliquant fortement dans les nouvelles énergies.

L'Etat français incite les collectivités publiques à développer les énergies nouvelles en subventionnant à hauteur de 30 à 50% les projets en lien avec les énergies renouvelables et de récupération (EnR&R). Ces subventionnements se font par le biais de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Ademe) et des Régions. D'ici à 2020 la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique globale française doit être portée à 23%.

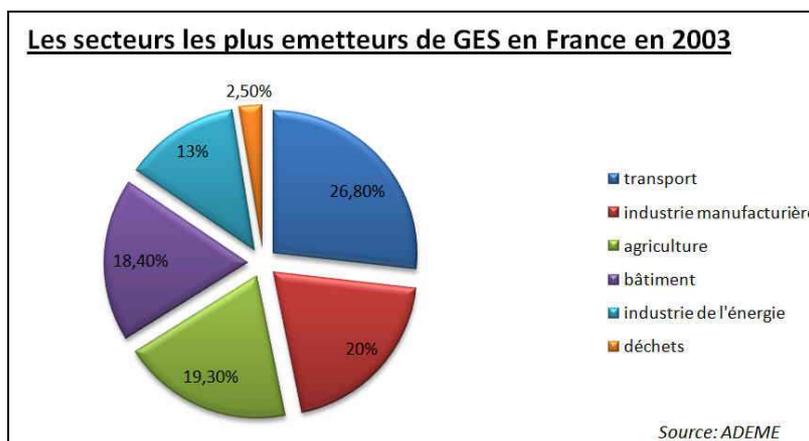
Ces nouvelles énergies sont extrêmement intéressantes car, à l'inverse des énergies fossiles, elles sont peu ou pas émettrices de GES. Les hydrocarbures (produits pétroliers, gaz naturel) et le charbon sont responsables de 90% des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Deux approches sont possibles pour contrer cet état de faits :

- La première consiste à rendre les installations plus performantes et donc moins consommatrices pour une même quantité d'énergie produite.
- La deuxième est de minimiser l'utilisation des énergies fossiles en les remplaçant par des énergies nouvelles et d'encourager le mix énergétique. Ce dernier permet, en plus de diminuer les émissions de GES, de diminuer la dépendance aux énergies fossiles.

Il est donc nécessaire de prendre conscience des secteurs dans lesquels les plus gros efforts doivent être fournis et ainsi mettre en évidence les leviers d'actions à mettre en œuvre pour maximiser les résultats positifs des actions menées.

Les cinq secteurs les plus émetteurs de GES en France sont le transport, l'industrie manufacturière, l'agriculture, le bâtiment et l'industrie de l'énergie. Malgré une diminution globale des émissions de GES de 2% depuis 1990, le bâtiment et le transport ont considérablement augmenté les leurs avec respectivement +14% et +23%. Cela implique que les efforts ont essentiellement été réalisés dans les autres secteurs.

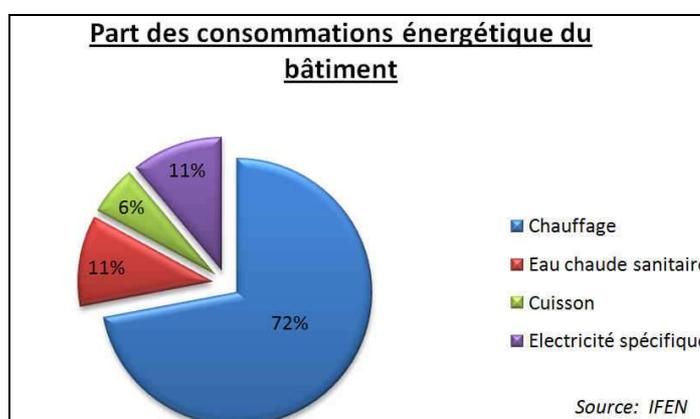
Etant donné le poids du bâtiment et du transport en termes d'émission de GES, c'est sur ces deux secteurs que devront porter les efforts les plus importants.



Si dans le secteur du transport, plusieurs moyens et techniques se mettent en place tels que les transports en commun, les véhicules peu émetteurs, etc., au niveau du bâtiment, les techniques peinent à se développer. On peut donc se demander comment agir et quels leviers actionner pour réduire drastiquement l'impact du bâtiment sur l'environnement en termes d'émissions de GES.

La Réglementation Thermique de 2005 (RT2005) spécifie des objectifs thermiques pour les constructions neuves en améliorant les performances énergétiques du bâtiment, le but étant de réduire la facture énergétique de 15%.

En France, le bâtiment représente plus de 40% de l'énergie consommée et environ 20% des rejets de GES. C'est donc l'un des secteurs les plus prometteurs en matière de progression de l'efficacité énergétique et d'intégration des énergies renouvelables. Si on regarde de plus près les consommations du bâtiment, on s'aperçoit que 70% de la consommation énergétique est consacrée au chauffage. Des efforts pour réduire les besoins en chauffage et/ou modifier les sources de chauffage auraient donc un impact non négligeable sur les besoins énergétiques et les émissions de GES liés au secteur du bâtiment. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de simplifier l'étude des besoins énergétiques du bâtiment aux besoins en chauffage.



Les nouvelles énergies permettent de produire de l'énergie sans émettre, ou seulement faiblement, des GES. Seules les énergies permettant d'alimenter un réseau de chaleur et pouvant répondre à des problématiques urbaines seront retenues dans le cas de cette étude. En effet, nous avons montré précédemment que la part du chauffage est

importante dans la facture énergétique d'un logement. Le cas des énergies produisant de l'électricité tel que le photovoltaïque ou l'éolien ne sera donc pas abordé mais pourra faire l'objet d'une étude complémentaire. Il en va de même pour le solaire thermique qui s'applique à une échelle beaucoup plus locale et est traité généralement individuellement.

Le but ici est de diminuer la dépendance aux énergies fossiles des villes et ainsi diminuer les émissions de GES. Ces énergies au fort Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) ne sont pas irremplaçables. Si on prend le cas du bois, avec un PCI 3 à 4 fois inférieur à celui du gaz naturel et du fioul, il reste compétitif sur le marché de l'énergie. Les grandes quantités de bois mobilisables localement et son faible coût permettent de compenser son faible PCI.

On arrive à des valeurs de comparaison de $1\text{PAC}^1 = 1000\text{kWh} = 100\text{L}$ de fioul.

Précédemment, nous avons montré à quel point il peut être intéressant de développer la filière bois pour alimenter des chaudières biomasse mais il existe aujourd'hui plusieurs ressources d'énergie non exploitées ou insuffisamment. La ville produit chaque année plusieurs centaines de tonnes de déchets, en moyenne un kilogramme de déchets ménagers par personne et par jour en France, soit deux fois plus qu'il y a 40 ans. En 2002, la France a produit 22 millions de tonnes de déchets ménagers dont 80% ont fini en décharge ou incinérés. Aujourd'hui, ces déchets ne sont pas toujours valorisés, il y a donc un manque à gagner à ce niveau. Néanmoins, nous ne prendront pas en compte l'incinération dans cette étude, bien qu'elle alimente aujourd'hui 80% des réseaux de chaleur approvisionnés par une EnR&R, car elle n'est pas considérée comme une énergie renouvelable. En contre partie, nous mettrons en avant le potentiel de la méthanisation et de la récupération de la chaleur des eaux usées, une énergie peu valorisée aujourd'hui.

Dans le cadre de cette étude, le bois a été considéré comme une ressource d'énergie de la ville car, en plus des exploitations forestières du bois énergie, les bois d'élagages, déchets de bois d'usines d'emballages bois, etc. peuvent également être utilisés pour alimenter une chaufferie biomasse.

Bien que très efficace, la géothermie ne sera pas abordée dans cette étude car elle n'exploite pas les ressources produites par la ville.

Un réseau de chaleur peut être comparé à un chauffage central à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Alimenté par une ou plusieurs centrales de production, le réseau distribue l'énergie aux bâtiments raccordés par l'intermédiaire de canalisations sous la voirie. La chaleur est livrée par le biais d'un échangeur thermique situé dans des postes de livraisons au pied des bâtiments. Ce dernier remplace les installations de production de chaleur individuelles. Le réseau permet de distribuer la chaleur de manière sûre, propre et économique.

Ces réseaux de chaleur présentent de nombreux points forts et peu de points faibles. Tout d'abord, le chauffage collectif permet une sécurité des installations, un abonnement et un entretien moins coûteux (maîtrise des charges), un confort et une répartition de la chaleur dans tous les logements et une souplesse des équipements car il n'y a pas d'intervention de la part des habitants. Ensuite, pour les collectivités, il y a des

¹ PAC = 1 m³ apparent de plaquette

avantages économiques avec par exemple la TVA à 5,5% pour les communes utilisant au moins 60% d'énergies renouvelables dans la fourniture de chaleur. Enfin les élus locaux sont impliqués dans le projet (délégation de service public). Un point faible relativement important est que les contrats de concession sont de relativement longue durée (15ans).

C'est dans ce contexte que nous nous sommes interrogés sur la possibilité de développer un outil méthodologique permettant, dans un milieu urbain donné, de créer des réseaux de chaleur alimentés par des sources d'énergies actuellement inexploitées (bois, eaux usées, déchets) afin de répondre aux besoins de chauffage des logements et ainsi limiter la dépendance aux énergies fossiles.

L'objet de ce rapport est d'estimer la capacité de production d'énergie de la ville en fonction de sa production de déchets, d'eaux usées et de sa ressource en bois et de la localiser dans la ville, de même pour les besoins en chauffage, puis de mettre en place un réseau de distribution de chaleur permettant de mettre en relation l'offre et la demande. La localisation des producteurs dépend de facteurs juridiques, mais aussi de décisions urbanistiques qui seront explicitées, et impacte sur les réseaux mis en place.

Afin de faire un arbitrage entre différents réseaux possibles, nous avons pris un indicateur de rentabilité que nous avons cherché à maximiser pour avoir le réseau le plus optimal.

Suite à la mise en place de cet indicateur, il nous a paru évident de chercher à évaluer l'impact des actions en faveur du développement durable sur la rentabilité des réseaux de chaleur urbain, leur mise en place faisant partie des actions mise en œuvre dans le cadre du Facteur 4.

Il s'agira tout d'abord d'explicitier les différentes notions théoriques nécessaires à la création d'un réseau support à la fois de la collecte des ressources et de la distribution de la chaleur, les technologies mises en œuvre afin de récupérer l'énergie des différentes ressources ainsi que les typologies créées pour estimer les besoins en chauffage de la ville et enfin le choix d'un indicateur de rentabilité. Nous présenterons également dans cette première partie la mise en place d'une méthode pour estimer et localiser la demande ainsi que l'offre et leur mise en relation.

La deuxième partie reprendra la méthode présentée en première partie et détaillera le choix des outils et la mise en œuvre du modèle. Nous verrons à ce moment là dans quelle mesure il est possible d'automatiser la procédure et la nécessité de prendre des décisions urbanistiques, ce qui n'est pas faisable par un outil informatique.

Enfin, ce modèle sera appliqué à un cas réel, celui du Noyau Urbain de Tours. Après avoir fait un état des lieux avec les données disponibles aujourd'hui et estimé la viabilité de la mise en place de réseaux de distribution de chaleur, nous verrons quel est l'impact des actions en faveur du développement durable (réduction de la consommation d'eau, amélioration des performances des bâtiments...) sur la rentabilité de ces réseaux. Nous ferons également des scénarios prospectifs à l'horizon 2030.

Afin de rendre le rapport plus lisible, nous avons organisé chacune de nos grandes parties sur le même plan à savoir : la création du réseau support de la collecte et de la distribution, le calcul des besoins, l'estimation et la localisation de l'offre et enfin le calcul de la rentabilité du réseau de distribution de chaleur.

PARTIE 1
ELABORATION DU MODELE
THEORIQUE

1. Les réseaux de collecte et de distribution

1.1 Des graphes comme les autres

a) Définition du graphe

En plus de son existence mathématique, le graphe est aussi une structure de données puissante pour l'informatique. Il permet de représenter simplement la structure, les connexions, les cheminements possibles d'un ensemble complexe comprenant un grand nombre de situations, en exprimant les relations, les dépendances entre ses éléments. En effet, un graphe est un modèle graphique contenant des nœuds (les sommets) reliés entre eux par des arcs (les arêtes). Selon que l'on choisisse d'orienter les arêtes ou de leur attribuer un poids (coût de passage), on parle de graphes orientés, respectivement valués.

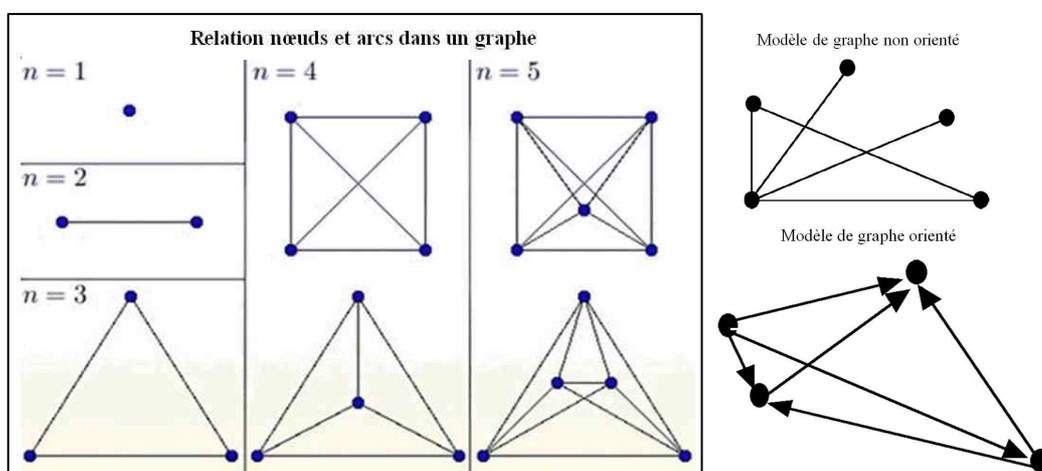


Figure 1: Relation nœuds et arcs dans un graphe

b) Le réseau de distribution et de collecte

L'énergie est acheminée depuis la source jusqu'au client par un réseau de distribution. Ce dernier est constitué d'une série de nœuds reliés les uns aux autres par des arcs, ce qui permet d'établir des chemins. Généralement, on attribut à chaque arc une valeur, voire plusieurs, correspondant à une information sur celui-ci (longueur, temps, coût, ...). On parle alors d'arc (multi)valué.

De part sa fonction et sa constitution, le réseau peut être assimilé à un graphe, ce qui permet de le modéliser et ainsi de traiter les données par informatique mais également de les spatialiser par l'intermédiaire d'un Système d'Information Géographique (SIG).

1.2 Construction du réseau de collecte et de distribution pour un traitement par SIG

a) Le réseau viaire, un outil d'organisation territoriale

Dans le cadre de cette étude, le réseau viaire est le support de la distribution d'énergie ou de la collecte de déchets et d'eaux usées. En effet, d'un point de vue urbain, il est directement lié aux réseaux souterrains qui permettent d'approvisionner tous les bâtiments du tissu urbain traité.

Le dictionnaire définit le réseau comme une « structure qui organise en connectant, la connexion est la vraie nature du réseau »¹. Cette organisation spatiale n'est pas seulement une succession d'arcs, il est nécessaire d'y intégrer le nœud qui y prend une place primordiale et notamment pour la distribution. En effet, sans lui on ne peut comprendre le réseau car il permet d'acheminer l'énergie vers un arc ou un autre. Du point de vue du réseau, les carrefours seront donc traités comme des sommets et les axes routiers reliant les carrefours comme les arcs du graphe.

Etant la base structurante de la morphologie urbaine, le réseau viaire est donc un modèle approprié pour distribuer la chaleur à l'espace urbain. Il est également utilisé pour la collecte des déchets et des eaux usées. A partir de là, deux principaux problèmes se posent pour organiser la distribution de chaleur et la collecte de matière par le réseau viaire par un outil informatique qu'est le SIG :

- Le réseau viaire, est-il entièrement utilisable ?
- Comment connecter le bâti au réseau ?
- Comment gérer la distribution et la collecte au niveau des nœuds ?

b) Les contraintes du réseau viaire sur un espace urbain.

Le réseau viaire est hiérarchisé en fonction du type de route, ce qui veut dire que toutes ne peuvent pas être interprétées comme étant un réseau de chaleur. Avant toutes manipulations sur le réseau, il est important de ne garder que les axes routiers susceptibles de le représenter. On entend par là qu'il est nécessaire d'ôter de la base de données les structures routières qui ne devraient pas faire partie du réseau.

On peut prendre comme exemples les autoroutes, le périphérique (pour les grandes villes) ou encore les voies de chemin de fer. En effet, ces infrastructures constituent de réelles barrières urbaines et ne sont pas des axes pouvant être exploités par le réseau de chaleur. Le contournement de ces barrières a des impacts importants au niveau de la rentabilité du réseau et de la distance parcourue, ainsi deux bâtiments peuvent se retrouver proches à vol d'oiseau mais être nettement plus éloignés en distance réseau.

¹ G. Dupuy, « réseau : philosophie de l'organisation »

c) La connexion entre le bâti et le réseau

L'étude se fait sur l'espace urbain, c'est-à-dire que le bâtiment est à proximité du réseau viaire. La distance connectant le bâtiment au réseau viaire est donc négligée. D'autant plus que les pertes de charge linéiques sont négligeables, surtout sur de toutes petites distances. On considère donc que le bâtiment est directement placé sur le réseau. Pour ce faire, il est nécessaire de représenter le bâti par un point qui représente sa position géographique. Ainsi, dans chacun des cas, on assimile un bâtiment à son centroïde.

Une fois cette étape terminée, il suffit de déplacer chacun des centroïdes sur le réseau en les joignant à l'arc le plus proche. La méthode consiste à tracer la normale à l'axe du réseau passant par le centroïde. Ce dernier est ensuite projeté sur le réseau en suivant cette normale. L'outil SIG permet de réaliser cette étape de manière très précise.

Le réseau est donc constitué maintenant de trois éléments :

- Les nœuds primaires (carrefours routiers),
- Les nœuds secondaires (les centroïdes des bâtiments raccordés au réseau)
- Les arcs (les canalisations du réseau)

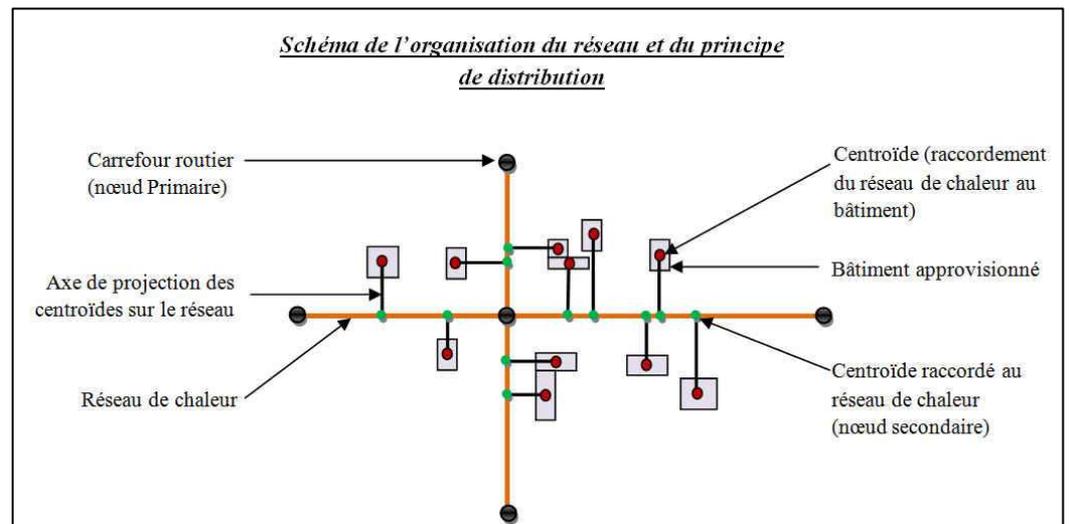


Figure 2: Organisation du réseau, principe de collecte et de distribution

Dans ce cas, les nœuds primaires n'ont qu'une fonction de connexion, l'échange de chaleur se faisant au niveau des nœuds secondaires.

Cette méthode permet également de palier le problème de la répartition de la chaleur lors de la distribution. C'est à dire que chaque bâtiment ne peut être placé que sur un seul arc. Ainsi, seuls les bâtiments présents sur l'arc seront approvisionnés en chaleur ou permettront l'approvisionnement en déchets ou eaux usées.

1.3 La simplification du réseau au regard de la spécificité urbaine

a) Des matrices carrées pour la gestion du réseau

La méthode présentée précédemment permet de traiter la distribution et la collecte à de petites échelles comme celles de l'îlot ou des petits quartiers. Cette limite est due au fait que l'on se retrouve dans un contexte urbain avec un maillage relativement fin. En effet, la complexité et la taille du modèle font que l'on se retrouve assez rapidement à devoir traiter une masse de données extrêmement importante voir trop importante pour pouvoir être étudiée correctement. La gestion de ces données se faisant par des calculs de matrices carrées, le simple ajout d'un nœud peut engendrer un temps de calcul long par le système informatique lorsque la matrice est déjà relativement importante. Il faut donc mettre en place une méthode permettant de traiter la distribution et la collecte sur des échelles urbaines.

b) Le carrefour routier, une zone de distribution et de collecte justifiée

D'un point de vue du réseau, chaque carrefour, représenté par un nœud primaire, peut être représenté comme un point central à partir duquel il y a une redistribution soit vers un autre carrefour, soit dans sa zone d'influence. En partant sur ce principe, on peut donc considérer chaque nœud primaire comme étant une sous-station d'échange qui reçoit de la chaleur ou de la matière. Dans le cas de la chaleur, elle puise ce dont elle à besoin puis la distribue au(x) nœud(s) primaire(s) autour(s), et ainsi de suite. Dans le contexte urbain, il paraît donc correct de faire correspondre à chaque carrefour les nœuds dans sa zone d'influence. Cette méthode permet de diminuer approximativement de 30% le nombre de nœuds traités. Bien entendu la variation du nombre dépend de chaque site d'étude et varie donc en fonction de l'organisation et du modèle de ville étudiée.

Il s'agit maintenant de construire ce modèle de manière à pouvoir l'appliquer au réseau de distribution et de collecte. Afin de délimiter des zones regroupant tous les points les plus proches autour de chaque carrefour, le diagramme de Voronoï est appliqué au territoire d'étude. Ce dernier permet de fragmenter le territoire en cellules de manière à tenir compte de la finesse du maillage. On a ainsi des polygones beaucoup plus serrés en centre ville qu'en zone périurbaine.

Il suffit ensuite de superposer les centroïdes des bâtiments rattachés au réseau obtenu avec les cellules de Voronoï. Les besoins de chaleur de tous les nœuds secondaires présents dans un polygone sont sommés puis attribués au carrefour central. Un nœud primaire représente donc la somme des besoins en chauffage, le nombre de déchets et la quantité d'eaux usées produits par tous les logements dans sa zone d'influence. Cette opération est réalisée pour chacune des cellules sachant qu'il y a autant de cellules que de nœuds primaires.

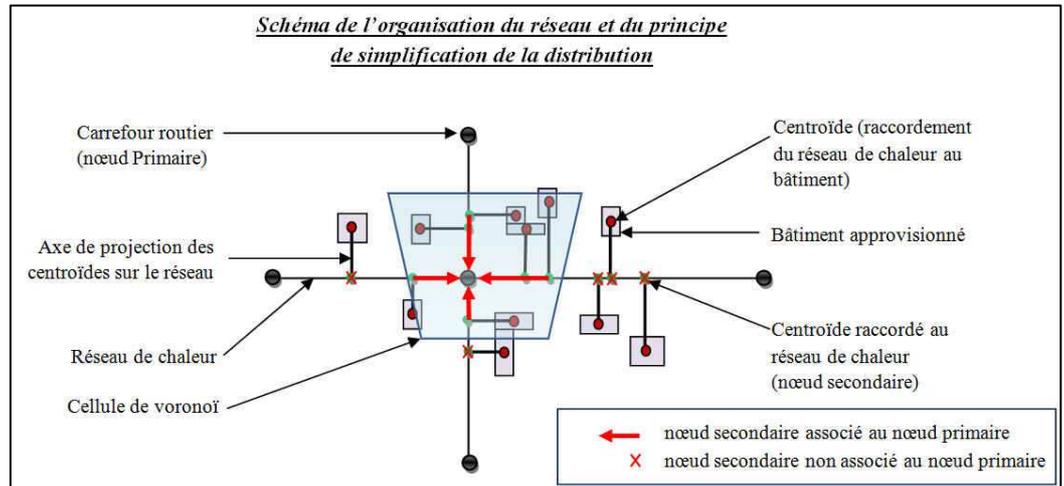


Figure 3: Principe de simplification du réseau

1.4 La topologie des réseaux

a) Réseau en bus

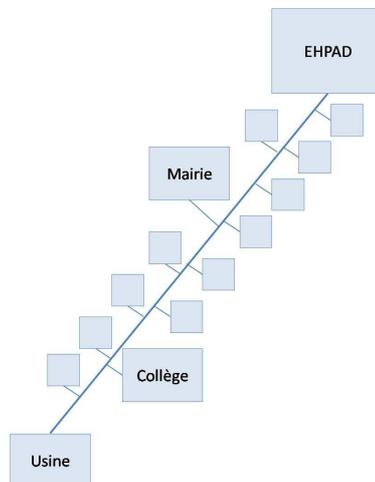


Figure 4: Réseau en bus

Le réseau en bus est le plus simple qui existe. Il est constitué d'un axe central de distribution d'énergie sur lequel se raccorde l'ensemble des consommateurs. Cette forme de réseau est utilisée pour de petits réseaux de chaleur, généralement en milieu rural, où un réseau est mis en place pour alimenter un équipement en particulier (EHPAD, établissement scolaire...). Le réseau relie la centrale de production à l'équipement et peut desservir les logements et autres équipements qui le bordent.

Le point faible d'un réseau de ce type est qu'au moindre problème sur la canalisation, l'ensemble du réseau est coupé et plus personne ne peut être approvisionné.

b) Réseau en étoile

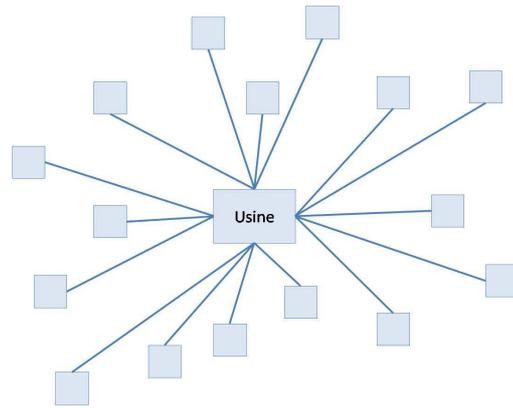


Figure 5: Réseau en étoile

Chaque consommateur est relié directement au producteur, par une conduite individuelle.

En termes de réseau urbain, c'est une aberration. Cela signifie que deux maisons situées l'une à côté de l'autre sont alimentées par deux canalisations distinctes, au lieu de faire deux embranchements en fin de réseau, une pour chaque maison puis un tuyau commun jusqu'au producteur. Par contre, si une canalisation est coupée, cela n'affecte pas le reste du réseau.

c) Réseau en arbre

C'est la forme qu'adoptent les réseaux de distribution de chaleur dans la grande majorité des cas.

Les conduites suivent le réseau viaire, ce qui permet, en cas de travaux à réaliser sur le réseau ou de mise en place d'un réseau de distribution de chaleur dans un tissu urbain existant, de ne percer que la voirie. Chaque consommateur est ensuite relié au réseau par une canalisation qui aboutit à une sous-station où se trouve un échangeur thermique.

S'il y a un problème sur un des embranchements du réseau, seuls les consommateurs se trouvant en aval seront impactés. Les répercussions dépendent donc en grande partie d'où se situe le problème, en début de réseau ou au bout d'un embranchement.

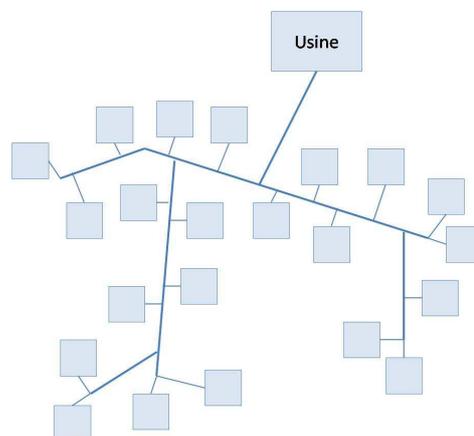


Figure 6: Réseau en arbre

2. Estimation des besoins de chauffage à l'échelle urbaine : la demande en énergie

Cette partie représente une étape importante dans la mise en place de solutions énergétiques alternatives. En effet, si l'on souhaite diminuer la dépendance aux énergies fossiles et électriques pour le chauffage des logements, il est indispensable de connaître leurs besoins. Généralement, l'étude particulière d'un bâtiment ne pose pas ou peu de problèmes, puisqu'il est possible d'examiner en détail ses dimensions, son architecture, la composition de ses parois ou encore sa date de construction. A l'échelle d'un territoire (131 km² pour le Noyau Urbain de Tours), la mise en place d'un outil pour un nombre important de bâtiments est plus compliquée puisqu'il n'est pas possible de regarder chaque construction individuellement. Le modèle développé prend en compte le parc de logements dans son ensemble, en utilisant des informations indispensables à l'estimation, comme la hauteur, le nombre d'étages ou la superficie. Une fois connus, ces besoins permettront de déterminer les zones de redistribution de chaleur des chaudières à bois, des usines de méthanisation et des unités de récupération de la chaleur des eaux usées.

Avant toute chose, il est important de savoir que la méthode proposée ne concerne que les bâtiments destinés au logement. Elle ne serait en effet pas applicable à des bâtiments industriels par exemple puisque ceux-ci sont construits différemment et ne sont pas utilisés de la même manière. De même, les habitations ont été considérées dans leur ensemble, en faisant abstraction des différences structurelles qui existent entre les maisons individuelles, les maisons en centre ville et les immeubles de grande hauteur.

Pour estimer les besoins, on va effectuer un bilan pour chaque bâtiment sur la durée de la période de chauffe. Cela signifie que l'on va ajouter ou soustraire les différentes pertes et gains qui interviennent. On retrouve quatre postes différents : les déperditions par l'enveloppe et par la ventilation pour les pertes ; les apports solaires et internes pour les gains.

2.1 Période de chauffe et degrés-heures

La période de chauffe est la durée en heures, sur une année, pendant laquelle les bâtiments considérés sont chauffés. Elle dépend du lieu de l'étude. Les degrés-heures sont la somme sur la période de chauffe de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur (aire en bleu sur le graphique ci-dessous). Ils donnent une indication sur la « quantité » de chauffage à fournir et peuvent être utiles pour comparer les besoins d'une année à l'autre. Ces deux valeurs sont généralement fournies par les services météorologiques.

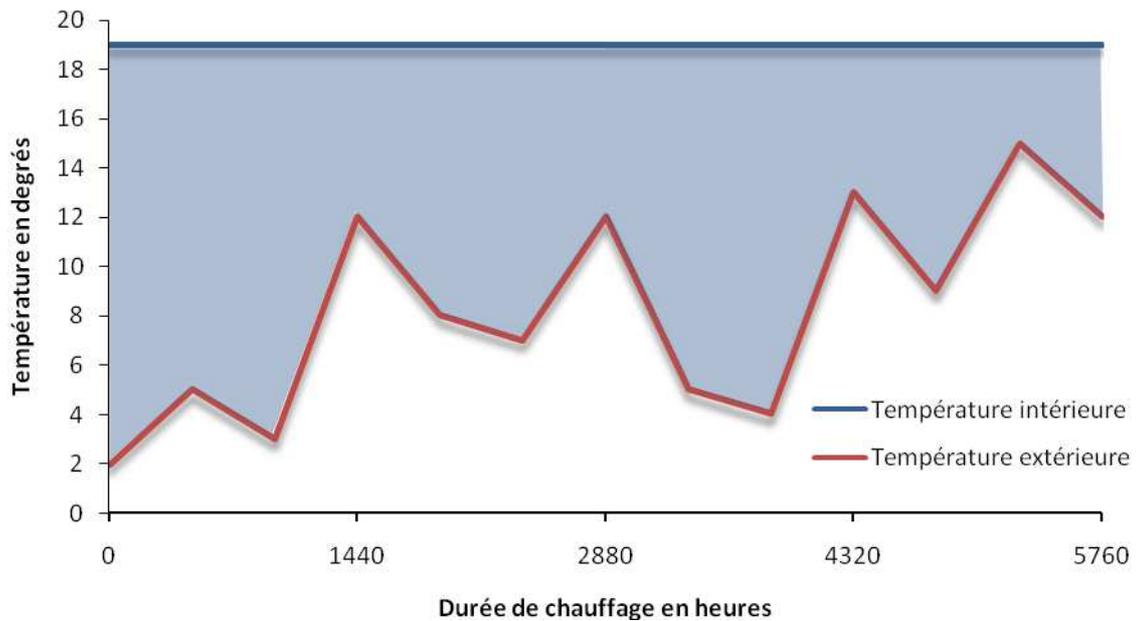


Figure 7: Illustration des Degrés-Heures

2.2 Les déperditions par l'enveloppe

Il s'agit de l'énergie perdue par un bâtiment par conduction à travers ses parois entre l'intérieur et l'extérieur uniquement. Il n'y a pas de pertes pour un mur, on considère que toutes les habitations sont chauffées à la même température. Les déperditions par l'enveloppe concernent à la fois les parois opaques et les vitrages. Elles vont surtout dépendre des matériaux de construction qui composent les murs, donc de la date de construction, mais aussi des dimensions des parois et du taux de vitrage. Pour les toits des bâtiments, l'hypothèse a été faite qu'ils sont plats et de même composition que les parois, notamment en raison des nombreux immeubles d'habitation. Leur surface est donc égale à la surface au sol du bâtiment.

Les déperditions par les parois opaques se déterminent par l'expression suivante :

$$dép = \frac{s1 \times DH}{0,17 + Rth} + \frac{s2 \times DH}{0,14 + Rth}$$

où :

- *dép* sont les déperditions par les parois opaques en Wh.
- *s1* est la surface des parois verticales en m² et est égale à
$$s1 = P \times H \times (1 - \tau v)$$

où :

- *P* est le périmètre du bâtiment en m.
- *H* est la hauteur du bâtiment en m.
- *τv* est le taux de vitrage du bâtiment.

- *s2* est la surface au sol du bâtiment en m².
- *DH* est le nombre de degrés-heures pour la zone considérée.
- 0,17 : valeur de la résistance aux échanges superficiels d'une paroi verticale avec l'extérieur en m².K/W.
- 0,14 : valeur de la résistance aux échanges superficiels d'une paroi horizontale (flux ascendant) avec l'extérieur en m².K/W.
- *Rth* est la résistance thermique de la paroi en m².K/W.

La résistance thermique d'une paroi est une caractéristique importante dans l'estimation des besoins. C'est sa capacité à s'opposer aux transferts de chaleur. Plus elle sera élevée, moins le bâtiment perdra de la chaleur, et inversement.

Pour la déterminer, une typologie est créée. Les différents bâtis du territoire sont regroupés selon les périodes de construction définies par l'INSEE. A chaque période va correspondre une valeur de résistance. Ces valeurs proviennent des différentes réglementations thermiques, du rapport ETHEL¹ et de l'étude APUR 2007². Les réglementations sont des textes de loi qui contraignent la construction des nouvelles habitations afin d'améliorer leur confort thermique. En France, quatre se sont succédées depuis 1974 : RT 1974, RT 1988, RT 2000, RT 2005.

¹ Charles RAUX, Jean-Pierre TRAISNEL, Jean-Pierre NICOLAS, Mindjid MAIZIA, Karine DELVERT (2005) *Bilans énergétiques Transport-Habitat et méthodologie BETEL*. ETHEL. Rapport R2. Action Concertée CNRS – Ministère de la Recherche. LET, Lyon.

² Atelier Parisien d'Urbanisme (2007) *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*.

Pour les déperditions par les vitrages, elles valent :

$$d_{\text{épv}} = H \times P \times \tau_v \times DH \times U_v$$

où :

- $d_{\text{épv}}$ sont les déperditions par les vitrages en Wh.
- H est la hauteur du bâtiment en m.
- P est le périmètre du bâtiment en m.
- τ_v est le taux de vitrage du bâtiment.
- DH est le nombre de degrés-heures pour la zone considérée.
- U_v est le coefficient de transmission surfacique des vitrages en $W/(m^2.K)$.

Le coefficient U_v détermine la capacité du vitrage à conduire la chaleur. Une valeur faible signifie donc une bonne isolation par les vitrages (double-vitrage par exemple). Ces valeurs sont déterminées de la même manière que les résistances thermiques des parois opaques, en créant des catégories à partir des périodes de construction de l'INSEE. Concernant le périmètre, c'est la valeur totale du bâtiment qui est utilisée. Cela est correct pour des bâtiments en périphérie mais donne des résultats imparfaits pour les habitations des centres-villes.

Période de construction	Résistance thermique (en $m^2.K/W$)	coefficient de transmission surfacique des vitrages (en $W/(m^2.K)$)	Taux de vitrage
< 1949	1/1.6	4.95	0.15
1949 - 1974	1/1.4	4.95	
1975 - 1981	1/1.2	4.5	
1982 - 1989	1	4	
1990 - 1998	1/0.9	2.8	
1999 - 2005	1/0.75	1.2	
2006 - 2008	1/0.45	1.1	0.2

Figure 8: Tableau des caractéristiques du bâti

2.3 Les déperditions par la ventilation

Ces déperditions sont causées par le renouvellement d'air obligatoire à l'intérieur de chaque habitation. La perte de chaleur se fait en même temps que l'air vicié est évacué. Ces déperditions se déterminent de la façon suivante:

$$d_{vent} = 0,34 \times Q_v \times DH$$

où :

- d_{vent} sont les déperditions par la ventilation en Wh.
- DH est le nombre de degrés-heures pour la zone considérée.
- Q_v est le débit horaire de renouvellement de l'air en m³/h.

Pour des logements, la valeur réglementaire Q_v pour la ventilation est de 18 m³/h/habitant.

2.4 Les apports internes

Les apports internes proviennent des habitants, de l'éclairage ou des différents appareils électriques qui fonctionnent dans l'habitation. Le chiffre donné par la réglementation thermique 2000 est de 4 W/m². Ainsi, l'énergie gagnée par les apports internes vaut:

$$A_i = 4 \times S \times D$$

où :

- A_i sont les apports internes en Wh.
- S est la surface habitable du bâtiment en m².
- D est la durée de la période de chauffe en heures.

2.5 Les apports solaires

Cette énergie, dégagée par le soleil, est transmise à un logement à travers ses vitrages. Pour connaître la valeur du flux reçu par un mètre carré de vitrage, il faut connaître les coordonnées géographiques du lieu, la date et l'orientation et l'inclinaison du vitrage. Pour un parc de logement, on considère que l'ensemble des surfaces vitrées sont positionnées de façon verticale. Trouver leur orientation est plus compliqué. Dans notre étude, l'orientation des surfaces vitrées des bâtiments est répartie également en treize tranches de 15 degrés entre le Nord et le Sud. Ainsi, en connaissant les coordonnées de la zone étudiée, l'objectif va être d'obtenir, pour chaque orientation et à chaque heure de l'année, l'intensité du flux solaire reçu.

En prenant en compte les 13 orientations possibles et 24 heures par jour pendant 365 jours, on arrive à 113 880 valeurs différentes (13 x 24 x 365). Ces données sont récupérables par l'intermédiaire de l'application « Info récepteur solaire » du projet Audience Architecture qui nous donne, pour une localisation, une orientation et une heure précise, la puissance reçue par mètre carré (en W/m²). Cet outil tient également compte du facteur de transmission du vitrage, 50% dans notre cas.

Figure 9: Application "Info Recepteur Solaire"

Cependant il est difficilement faisable de relever l'intégralité des valeurs pour l'ensemble de l'année en raison de leur trop grand nombre ; notre méthode se limite à quatre jours : le 21 mars, le 21 juin, le 21 septembre et le 21 décembre (soit 1248 valeurs). Il est ensuite possible de réaliser une interpolation, pour obtenir l'ensemble des données, pour chaque orientation et la durée complète de l'année. Enfin, pour déterminer l'énergie reçue par mètre carré (Wh/m^2), il suffit d'intégrer, pour chaque orientation, les valeurs du flux (W/m^2) sur la durée de la période chauffage considérée. Dernier point, la multiplication de la surface vitrée d'un bâtiment par l'énergie reçue par mètre carré nous donne les apports solaires.

On a donc :

$$As = \sum_{i=1}^{13} \frac{1}{13} \times P \times H \times \tau v \times \varphi i$$

où:

- As sont les apports solaires en Wh.
- P est le périmètre du bâtiment en m.
- H est la hauteur du bâtiment en m.
- τv est le taux de vitrage du bâtiment.
- φi est l'énergie solaire reçue selon l'orientation pendant la période de chauffage en Wh/m².

La valeur φi doit cependant être corrigée par plusieurs facteurs de réduction qui ne sont pas pris en compte par l'outil « Info récepteur solaire ». Tout d'abord, on peut considérer l'effet de masque créé par les bâtiments les uns par rapport aux autres. Cet effet de masque est plus important sur les bâtiments du centre-ville qu'en périphérie (lotissements par exemple) mais nous n'avons pas d'outil qui permettrait de le déterminer pour chaque immeuble. Nous avons choisi de prendre pour valeur globale le masque qui existe dans une rue en « U », de largeur égale à la hauteur des immeubles qui la bordent. L'application « Écran solaire » du projet Audience Architecture donne à son utilisateur la valeur du masque selon une configuration définie. Comme pour les apports, les effets du masque sont enregistrés pour quatre jours, puis complétés par interpolation.

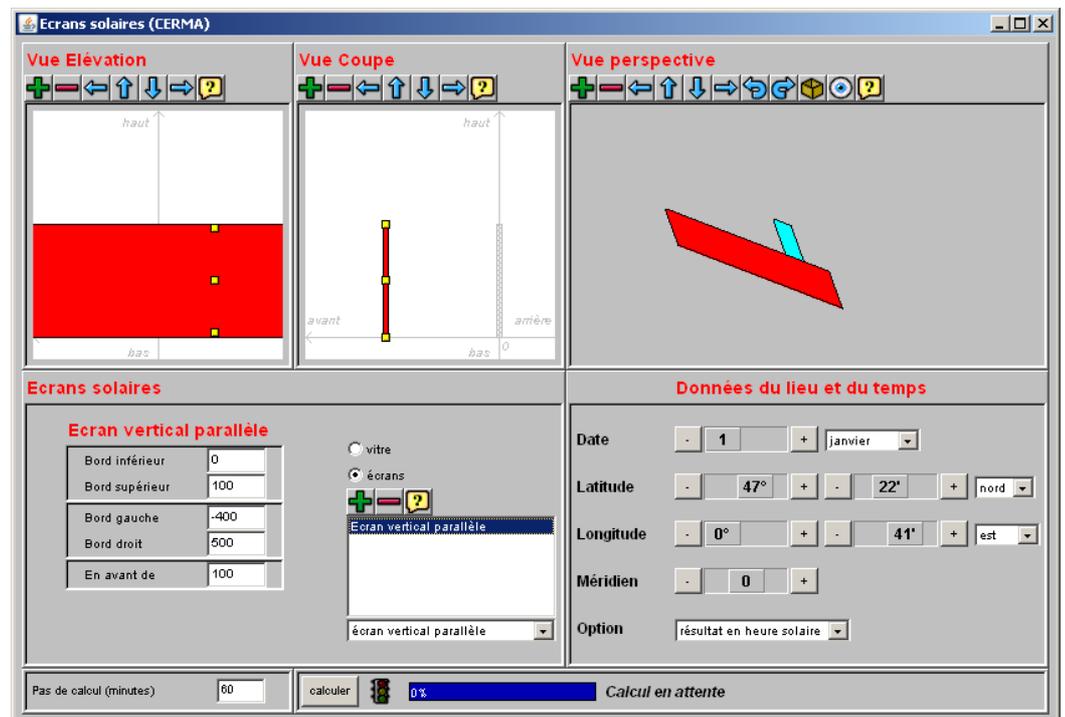


Figure 10: Application "Ecrans Solaire"

Orientation par rapport au Sud	Sud (0°)	15°	30°	45°	60°	75°
Effet de masque	21,9%	30,3%	26,9%	27%	26,7%	25,3%

Orientation par rapport au Sud	90°	105°	120°	135°	150°	165°	Nord (180°)
Effet de masque	22,9%	20,6%	17,1%	12,1%	10,2%	7,4%	2%

Figure 11: Effet de masque selon l'orientation

En plus de l'effet de masque, l'ensoleillement peut-être masqué par la couverture nuageuse, les fumées industrielles, le brouillard... Ce coefficient, appelé fraction d'insolation, varie entre 40 et 90%, et dépend de la localisation de l'espace urbain étudié. Enfin, le rayonnement solaire peut également être bloqué par des volets ou des rideaux. Cette diminution est prise égale à 15%. Au final, l'énergie solaire reçue selon l'orientation pendant la période de chauffe vaut :

$$\varphi_i' = \varphi_i \times (1 - Em) \times Fi \times 0,85$$

où :

- φ_i' est l'énergie solaire reçue selon l'orientation pendant la période de chauffe après application des effets de réduction en Wh/m².
- φ_i est l'énergie solaire reçue avant réduction en Wh/m².
- Em est l'effet de masque selon l'orientation.
- Fi est la fraction d'insolation.

Les apports solaires deviennent ainsi égaux à :

$$As = \sum_{i=1}^{13} \frac{1}{13} \times P \times H \times \tau_v \times \varphi_i'$$

où:

- As sont les apports solaires en Wh.
- P est le périmètre du bâtiment en m.
- H est la hauteur du bâtiment en m.
- τ_v est le taux de vitrage du bâtiment.
- φ_i' est l'énergie solaire reçue selon l'orientation pendant la période de chauffage après application des effets de réduction en Wh/m².

2.6 Bilan

Une fois les différents postes connus, on peut calculer les besoins finaux qui constituent donc la demande en énergie des habitations :

$$B = (dép + dépv + dvent) - (Ai + As)$$

où :

- B sont les besoins pour une année de chauffage en Wh.
- $dép$ sont les déperditions par les parois opaques en Wh.
- $dépv$ sont les déperditions par les vitrages en Wh.
- $dvent$ sont les déperditions par la ventilation en Wh.
- Ai sont les apports internes en Wh.
- As sont les apports solaires sur la période de chauffage en Wh.

3. L'offre matière

Après avoir abordé la théorie de l'estimation des besoins de chauffage, nous allons maintenant nous intéresser à l'offre matière. Il s'agira pour les trois composantes choisies (bois, méthanisation et eaux usées) d'expliquer les techniques, de localiser les centrales de production, d'estimer les gisements matière et ainsi de déterminer le potentiel de production de chaleur.

3.1 L'offre bois

En 2007, la France comptait 450 réseaux de chaleur, dont 75 alimentés par des chaudières à bois¹. Les politiques actuelles ont pour but de faire augmenter cette proportion. Le bois est peu exploité en France par rapport à son potentiel. Etant une énergie alternative aux énergies fossiles, et ayant un fort potentiel en France, c'est une filière qui prend son essor. Nous considérerons que le bois issu des forêts françaises est une énergie renouvelable car les forêts sont gérées de manière durable. Cela signifie que la quantité de bois prélevée est inférieure à celle produite par les forêts. Ainsi, l'offre bois représente une énergie alternative potentiellement importante que l'on étudiera à travers le scénario bois.

Afin de modéliser l'offre bois alimentant un réseau de chaleur, nous nous demanderons comment localiser les chaudières dans un milieu urbain et comment déterminer leurs principales caractéristiques.

a) Les technologies

Une chaufferie bois est un bâtiment comprenant une chaudière alimentée par du bois, un lieu de stockage du combustible ainsi que d'autres équipements que l'on peut voir sur le schéma ci-dessous.

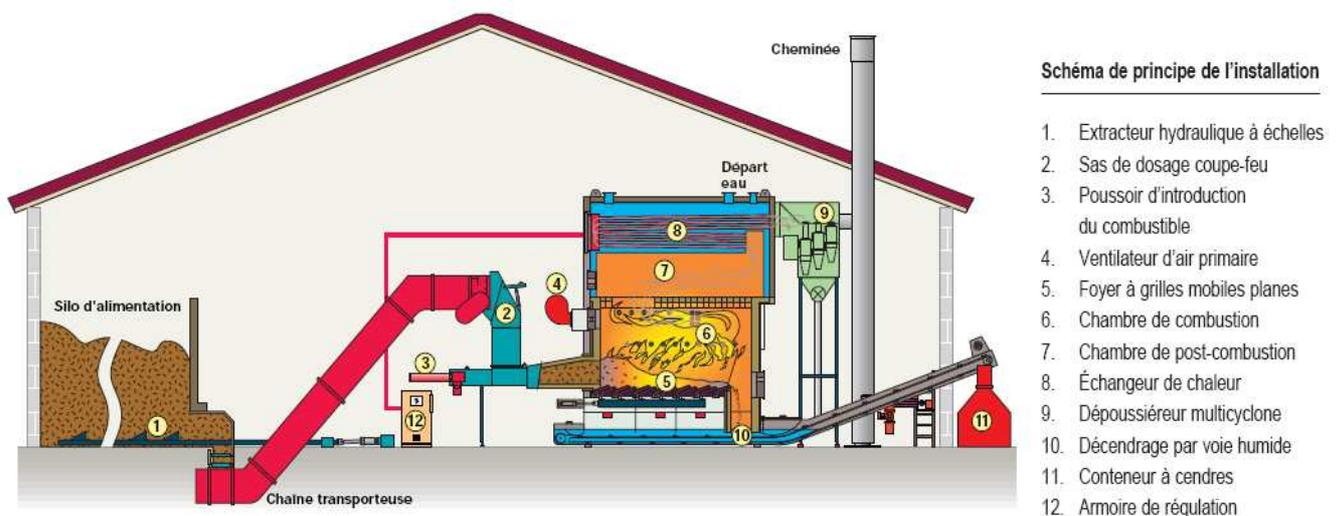


Figure 12: Vue de profil d'une chaufferie à Scy-sur-Saône (Source : Ademe)

¹ Actu-environnement.com

Le silo d'alimentation est l'équipement utilisant le plus d'espace avec la chambre de combustion elle-même. Ce lieu de stockage permet de mettre à l'abri le bois, afin qu'il ne prenne pas l'humidité. Le bois humide étant moins performant au niveau énergétique.

Afin d'automatiser au maximum la gestion de la chaudière, il est possible de mettre en place un système qui alimente la chaudière mécaniquement (représenté par une chaîne transporteuse et un poussoir d'introduction du combustible sur le schéma ci-dessus).

Bien qu'il soit un mode de chauffage parmi les plus écologiques, le chauffage au bois émet des cendres. Selon la puissance de la machine, les cendres sont éliminées selon la filière des ordures ménagères et assimilés ou selon la filière des déchets ultimes. Il existe des filières de valorisation de ces cendres : selon leur composition elles peuvent être utilisées pour enrichir un compost de déchets verts. De plus, comme les boues des stations d'épuration, les cendres peuvent être épandues en milieu agricole. Il est possible aussi de les épandre en milieu forestier mais cette filière de valorisation est encore peu utilisée en France.

En plus des cendres, les chaudières émettent certains gaz, tel le monoxyde de carbone, il existe des systèmes de filtration pour ces gaz. Des contraintes peuvent être imposées sur les normes de rejets des gaz de combustion ou encore sur les hauteurs des cheminées afin que l'air reste sans danger pour les habitations autour.

Les chaudières bois permettent de valoriser les sous produits issus de la filière bois. Il faut cependant éviter d'utiliser du bois sur lequel il y a des solvants, cela peut à terme détériorer la machine.

Le dimensionnement d'une chaudière se fait à partir du pic des besoins. Cela signifie que la plupart du temps la machine fonctionne en sous régime. Or, plus une chaudière est en sous régime moins elle est rentable. A partir d'une certaine puissance il est peu pertinent de construire une seule chaudière. Il vaut mieux privilégier l'association de plusieurs petites chaudières.

b) Les espaces urbains susceptibles d'abriter les centrales de production

Comme nous l'avons vu précédemment, les procédés existants permettent d'installer des chaudières de puissances variées. Nous déterminerons les espaces urbains susceptibles d'accueillir des centrales de production selon la taille des chaufferie.

Selon la puissance (et donc la taille) des centrales installées, la surface nécessaire varie. Ainsi la différenciation des catégories de chaufferie (1 MW, 2MW, 5MW...) sera calquée sur des catégories de parcelle (petite, moyenne et grande) et sera réalisé à partir des critères de surface.

i) Détermination des catégories de chaufferies

Nous avons cherché, en nous appuyant sur des exemples, à établir une corrélation entre la puissance de la chaudière et la surface occupée par la chaufferie.

Localisation	Surface du local	Puissance (MW)	Consommation annuelle de bois
Obernai (Alsace)	126 m ²	1,4	600 t
Lisieux (Calvados)	700 m ²	2*5	12 200 t
Lyon Saint Fons (Rhône)	170 m ²	1,3	1600 t
Nozay (Loire-Atlantique)	50 m ²	0,32	175 t
Abbaye de la pierre qui vire (Yonne)	110 m ²	1,02	590 t
Scey-sur-Saône (Hte-Saône)	-	2,5	4 000 t

Figure 13: Principales caractéristiques de chaufferies bois existantes

Remarque : certaines centrales sont composées d'une chaudière bois et d'une autre fonctionnant au gaz ou au fuel

Nous avons établi trois catégories de chaufferies avec des critères de surface minimum nécessaire. Elles doivent comprendre non seulement la surface pour installer le local de la chaufferie mais aussi l'espace nécessaire aux poids lourds pour stationner et décharger leur cargaison. C'est pour cela que la surface des parcelles pour les chaufferies de 1 MW est amenée à 300 m². Ces critères peuvent être adaptés selon le territoire sur lequel l'outil est appliqué.

Parcelle	petite	moyenne	grande
Puissance chaudière	1MW	2MW	5MW
Surface approximative du local	100 m ²	200 m ²	350 m ²
Surface minimale de la parcelle	300 m ²	400 m ²	900 m ²

Figure 14: Catégories de parcelles

ii) Les critères

- *Critère de proximité d'autres bâtiments*

Les complexes de chaudières d'une puissance supérieure à 2 MW doivent être situés à plus de 10m des ERP et des installations mettant en œuvre du combustible (Rubrique n° 2910 des ICPE).

- *Plan de Protection de l'Atmosphère*

Si l'installation se situe dans une agglomération possédant un Plan de Protection de l'Atmosphère. Il peut y avoir des contraintes sur les émissions des chaudières. La combustion de bois émet comme principal polluant du monoxyde de carbone (CO), celui-ci étant nocif pour la santé. Il existe des techniques de type filtre qui permettent aux chaudières d'émettre des quantités dans les normes. Ce n'est cependant pas un gaz à

effet de serre.

- *Constructibilité*

Au niveau de la réglementation, il faut prendre en compte le zonage du PLU. La construction de chaudière ne peut se faire dans une zone qui n'est pas classée comme constructible.

- *Inondation*

Si le territoire est soumis aux risques d'inondation, les chaudières ne doivent pas être placées en zone inondable. Cela est nécessaire pour réduire les risques en cas d'inondation. Ceci est d'autant plus important que la mise hors service des chaudières peut impacter des populations qui n'habitent pas en zone inondable mais qui sont desservis par les chaudières. Ainsi, une localisation pertinente des chaufferies par rapport à ces aléas permettra de réduire au maximum la vulnérabilité du territoire.

- *Présence d'une route à proximité*

Afin de pouvoir être desservie par des camions, la parcelle doit avoir accès à une route accessible aux poids lourds. Ce critère nous permet de retirer de la liste les parcelles accessibles uniquement par des petits chemins ou ruelles.

- *Les critères de surface*

Le principal critère de choix entre les différentes puissances de chaudières est la surface des parcelles. Afin de prendre en compte de la limite de 10 m vue précédemment, la surface des parcelles pour les chaudières dont la puissance dépasse 2 MW doit être réévaluée.

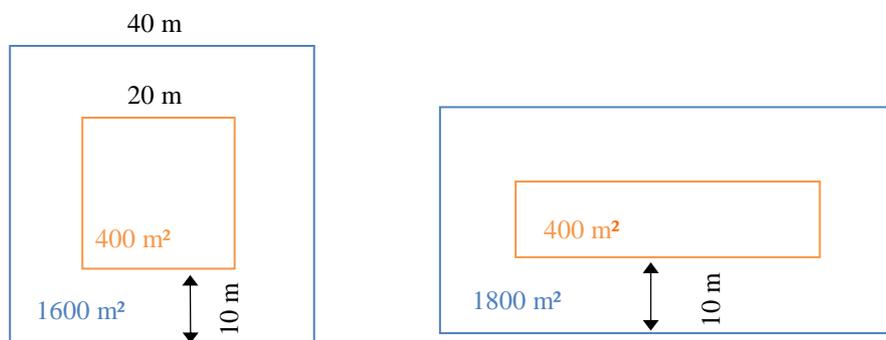


Figure 15: Schématisation de la modification des critères de surface

Pour les chaudières de 2 MW, la surface, après prise en compte des 10 m, est de 1600m² pour une forme carré et 1800 m² pour une forme rectangulaire allongé. Cette surface n'est pas perdue pour autant, elle peut être utilisée lors des livraisons et du stockage.

De même, la limite pour les chaudières de 5 MW passe de 900m² à 2500 m².

Il n'y a pas de modification de surface pour les petites parcelles car elles ne sont pas soumises à la réglementation des 10 m qui ne s'applique qu'aux chaudières de plus de 2 MW.

Puissance	1 MW	2 MW	5 MW et plus
Surface du local	100 m ²	200 m ²	350 m ²
Surface minimum	250 m ²	400 m ²	900m ²
Surface minimum comprenant les 10 m utilisés comme critère	250 m ²	1600 m ²	2500m ²

Figure 16: Modification des critères de surfaces

- *Morphologie de la parcelle*

Parmi les parcelles éligibles certaines peuvent être de forme trop allongée et donc inutilisables du fait de leur faible largeur. Pour résoudre ce problème, il faut enlever les parcelles dont le rapport grand axe/périmètre est proche de 2.

Une fois cet indicateur calculé, on sélectionne les parcelles en gardant celles répondant aux critères suivant:

- supérieur à 2,2 pour les grandes parcelles
- supérieur à 2,3 pour les moyennes parcelles
- supérieur à 2,5 pour les petites parcelles

Le critère varie selon la surface des parcelles, il est en effet peu gênant qu'une grande parcelle est une forme longiligne, du moment qu'elle dispose d'une largeur minimum permettant l'installation de la chaufferie.

De même, afin d'éviter des formes de parcelles en U, nous requerrons la présence du centroïde de la parcelle à l'intérieur de celle-ci.

- *Finalisation de la sélection*

Il est possible que certaines parcelles soient en réalité des parkings, des cimetières ou des parcs ; d'autres sont en forme de T, ou reliées à la route par un mince passage. Les critères énoncés ci-dessus n'éliminent pas ces parcelles, ils ne sont donc pas suffisants. C'est pourquoi il est nécessaire de connaître le territoire pour finaliser la sélection et adapter au mieux la localisation des centrales. De plus, cette finalisation permet de placer les chaufferies de manière équilibrée sur le territoire.

c) De l'installation des chaufferies à l'estimation des ressources nécessaires

Après avoir défini la puissance des chaudières que l'on veut installer, nous pouvons répartir cette puissance au sein du tissu urbain à partir de la connaissance de la puissance correspondant au pic des besoins par bâtiments. Ainsi, il est possible d'obtenir une zone de distribution potentielle de l'énergie. A partir de cette emprise, composée des bâtiments environnants la chaufferie, nous pouvons connaître la quantité de chaleur de la demande énergétique.

Nous considérerons que les chaudières et leur réseau de chaleur ont un rendement de 0,85. Ainsi, la quantité d'énergie de la demande est divisée par ce rendement pour connaître la quantité de chaleur que doit réellement fournir la chaufferie.

Les ressources en bois énergie se caractérisent par leur pouvoir calorifique. Le pouvoir calorifique correspond à « la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète sous pression atmosphérique normale de 1,013 bars, de l'unité de quantité de ce combustible »¹. Il existe deux sortes de pouvoirs calorifiques : le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) et le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) qui s'expriment en kWh/t de bois. Afin d'obtenir les quantités de bois nécessaires pour répondre à la demande nous utiliserons le PCI.

Le PCI du bois varie essentiellement selon son l'humidité et dans une moindre importance selon l'essence. Il serait peu pertinent de différencier chacune des essences mais nous pouvons les classer selon deux catégories : les feuillus et les résineux. Afin de laisser le choix entre une alimentation en feuillus et une alimentation en résineux, nous calculerons deux PCI. Ainsi, deux courbes seront utilisées pour calculer le PCI du bois : le PCI en fonction de l'humidité pour les feuillus et pour les résineux.

Le tableau ci-dessous présente les PCI en kJ/kg, ils sont convertis en kWh/t afin d'être utilisables pour la suite des calculs.

% humidité	0	5	10	15	20	25	30	35	40
feuillus kJ/kg	18246	17208	16170	15133	14095	13057	12020	10982	9944
feuillus kWh/t	5072	4784	4495	4207	3918	3630	3342	3053	2764
résineux kJ/kg	19186	18101	17017	15932	14847	13763	12678	11593	10509
résineux kWh/t	5334	5032	4731	4429	4127	3826	3524	3223	2922

% humidité	45	50	55	60	65	70	75	80	85
feuillus kJ/kg	8907	7869	6831	5793	4756	3718	2680	1643	605
feuillus kWh/t	2476	2188	1899	1610	1322	1034	745	457	168
résineux kJ/kg	9424	8339	7254	6170	5085	4000	2916	1831	746
résineux kWh/t	2620	2318	2017	1715	1414	1112	811	509	207

Figure 17 : Tableau des PCI en fonction de l'humidité (Source : ADEME)

A partir de ces données, les équations de calcul des PCI en fonction de l'humidité ont pu être déterminées :

h : humidité du bois %

Equation de la courbe du PCI pour les feuillus : $PCI = - 57,696 \cdot h + 5072,2$

Equation de la courbe du PCI pour les résineux : $PCI = - 60,309 \cdot h + 5333,7$

¹ Validation des méthodes de mesures des caractéristiques des combustibles bois déchiquetés, ADEME Critt Bois -Fibois, mars 2002, 62p.

Il faut donc fixer l'humidité du bois avec lequel on veut alimenter les centrales ainsi que son essence. Une fois le PCI déterminé, les quantités de bois nécessaires à l'alimentation de la chaudière pour répondre à la demande se calculent par l'opération suivante :

$$\text{Quantité de bois (t)} = \text{Quantité de chaleur (en kWh)} / \text{PCI (kWh/t)}$$

Ainsi, à partir des besoins auxquels doit répondre le réseau de chaleur, de l'humidité du bois voulu et de son essence, il est possible de déterminer la quantité de bois nécessaire pour répondre à la demande de chauffage.

Une fois la quantité de bois connue, la surface de forêt nécessaire pour couvrir ces besoins peut être calculée. Nous considérerons qu'une forêt tempérée française a une production annuelle de 3 tonnes de bois par hectare¹, donc une forêt de 80 ans produit 240 t de bois par hectare. Cet indicateur sera utilisé par la suite.

¹ « Les énergies renouvelables », Jacques Vernier, collection Que-sais-je.

3.2 Méthanisation

a) Généralités sur la méthanisation

La méthanisation est une technique qui permet le traitement des déchets de manière durable comparé à d'autres techniques comme l'incinération. Cependant la méthanisation ne permet pas de traiter l'ensemble des déchets ce qui en fait une technique complémentaire de l'incinération et non une technique de totale substitution.

La méthanisation est un processus de fermentation anaérobie, c'est-à-dire une décomposition de matières putrescibles par des bactéries qui agissent en l'absence de dioxygène. Cette décomposition est permise par une succession de réactions biochimiques. Cette suite de réactions permet au final une production de biogaz. La décomposition de la matière se fait dans un digesteur, ou méthaniseur, dont l'atmosphère est maintenue chaude et humide. La production de biogaz est en partie utilisée pour maintenir la température dans le digesteur à hauteur de 25% du biogaz produit.

Une unité de méthanisation est constituée d'une zone close pour le stockage des déchets, d'un digesteur pour méthaniser les déchets et d'un réservoir pour stocker le biogaz produit.

i) Choix des déchets traités

Les déchets méthanisables sont divers et variés. On y trouve :

- Les déchets verts (des ménages et des collectivités)
- Les ordures ménagères dites putrescibles autres que les déchets verts
- Les déchets agricoles et d'élevage
- Les déchets des industries agro-alimentaires
- Les boues de stations d'épuration

Dans le cas de notre étude, nous nous intéressons à l'implantation de la méthanisation en milieu urbain. Nous allons donc nous intéresser uniquement aux déchets verts et aux ordures ménagères putrescibles. Nous ne prendrons donc pas en compte les déchets cartons et papiers, pourtant putrescibles, puisque ceux-ci sont destinés au recyclage. Les déchets agricoles et d'élevage sont eux voués à être utilisés pour la méthanisation dite à la ferme. Nous ne prendrons pas non plus en compte les déchets des industries agro-alimentaires et les boues de station d'épuration du fait de la difficulté à quantifier ce gisement de déchets pour un espace urbain donné.

ii) Production et valorisation du biogaz

La production de biogaz dépend de la nature des déchets méthanisés. D'après l'Ademe, la méthanisation d'une tonne de déchets provenant des ordures ménagères mélangées à des déchets verts permet la production de 100 m³ de biogaz, dont 60% de méthane. La production de biogaz peut varier en fonction de la qualité des déchets collectés.

Le biogaz ainsi créé peut être valorisé. Il existe différentes possibilités afin de le valoriser pour chauffer des bâtiments. La première consiste à produire simultanément de la chaleur et de l'électricité. Il s'agit de la cogénération. Il est alors possible de produire 300kWh thermiques et 200kWh électriques avec une tonne de déchets. Le rendement de la machine fait perdre 100kWh. L'objectif étant de créer des réseaux de chaleur urbains, la part électrique peut être transformée en chaleur avec un rendement de 0,95. On obtiendra alors un total de 490kWh thermiques par tonne de déchets traités. La cogénération n'est possible que pour des unités de méthanisation de moyenne ou grande taille, c'est-à-dire supérieures à 40000 tonnes de déchets traités par an.

La deuxième possibilité est la combustion du biogaz produit pour produire de la chaleur. La combustion du biogaz issu de la méthanisation d'une tonne de déchets permet de produire environ 600kWh thermiques.

L'objectif étant de créer des réseaux de chaleur et non de produire de l'électricité il est préférable d'opter pour la deuxième solution, d'autant que celle-ci n'impose pas de contraintes concernant la taille de l'unité de méthanisation. Sur les 600kWh thermiques produits, 25% seront utilisés pour maintenir la température du digesteur. Par conséquent on a à disposition 450kWh par tonne de déchets traités pour alimenter un réseau de chaleur pour chauffer les logements. Le biogaz étant stocké, il est possible de chauffer des bâtiments pendant toute l'année. Une quantité plus importante de biogaz sera brûlée afin de gérer les pics de consommation.

b) Mise en place d'un modèle

i) Calcul du gisement de déchets d'un espace urbain donné et quantité de chaleur

Les déchets que nous avons choisis de méthaniser dans notre étude proviennent donc de deux sources différentes. Il y a d'abord la part putrescible des déchets ménagers estimée à 120 kg/an/habitant en France dont 60kg de déchets verts d'après les données de l'Ademe. La seconde source concerne les déchets verts putrescibles produits par les espaces verts publics. Cette source est estimée à 60 kg/an/habitant (ADEME). La quantité de déchets pouvant être méthanisée est donc de 180 kg/an/habitant. Cependant ce chiffre peut légèrement varier d'un espace urbain à un autre. Des données plus précises d'un point de vue territorial sont parfois disponibles.

La valeur massique du gisement G en tonnes de déchets d'un espace urbain donné est déterminée par :

$$G = \frac{\text{Nombre d'habitants de l'espace urbain} \times 180}{1000}$$

La chaleur Q pouvant être produite par ce gisement G est :

$$Q = G \times \text{Chaleur produite par tonne de déchets}$$

Comme on l'a vu précédemment, une tonne de déchets méthanisés produit 450 kWh pouvant être utilisés pour le chauffage de bâtiments.

ii) Mise en place de scénarios faisant varier la taille des unités

Pour l'offre méthanisation, il peut être intéressant de mettre en place différents scénarios qui varient par le nombre d'usines implantées dans l'espace urbain choisi. Le nombre de scénarios dépend quant à lui du gisement déchet disponible dans l'espace urbain étudié. Il est donc possible de faire des scénarios à 1, 2, 4, 8 ... usines selon la taille de l'espace urbain. Le gisement sera alors entièrement utilisé par une seule usine ou bien divisé en 2, 4 ou 8 parts égales afin d'alimenter chaque usine. Dans notre cas, ces scénarios auront deux objectifs. Le premier est d'identifier le nombre d'usines optimal afin de limiter en distance le transport pour collecter les déchets et ainsi limiter les émissions de CO₂. Le second objectif sera de comparer les scénarios en terme d'insertion urbaine, savoir s'il est plus facile d'insérer une grande unité de méthanisation ou plusieurs petites unités.

iii) Choix d'une localisation au sein d'un milieu urbain

Les parcelles libres d'un espace urbain donné susceptibles d'accueillir une unité de méthanisation doivent répondre à différents critères.

La première exigence concerne la surface des parcelles. En effet, afin d'accueillir un méthaniseur, une parcelle doit posséder une surface minimale. Cette surface minimale dépend de la quantité de tonne de déchets traitée. Par conséquent les surfaces nécessaires dépendent des scénarios choisis.

La seconde exigence concerne la constructibilité des parcelles. En effet, pour construire une usine de méthanisation il est indispensable que la parcelle accueillant l'usine soit constructible. La donnée de constructibilité est issue du Plan Local d'Urbanisme(PLU). Ainsi toutes les parcelles situées en zone U ou AU sont susceptibles d'accueillir un méthaniseur à condition qu'elles vérifient les autres exigences.

Le troisième critère implique que la parcelle pouvant accueillir une unité de méthanisation ne soit pas en zone inondable. En effet une usine de méthanisation stocke des déchets en quantité et on ne peut pas prendre le risque que ces déchets se retrouvent dans le milieu naturel après une inondation.

La quatrième exigence concerne la présence d'un axe routier important à proximité de la parcelle. Il est indispensable d'avoir un axe de ce type afin d'alimenter en déchets les usines.

Le dernier critère est d'ordre législatif et implique que les parcelles susceptibles d'abriter un méthaniseur respectent une distance minimale de 50 mètres entre l'extérieur du digesteur et la plus proche habitation. Cette distance provient d'un arrêté du 10 novembre 2009 qui stipule : «La distance entre les digesteurs et les habitations occupées par des tiers ne peut pas être inférieure à 50 mètres, à l'exception des logements occupés par des personnels de l'installation et des logements dont

l'exploitant ou le fournisseur de substrats de méthanisation ou l'utilisateur de la chaleur produite a la jouissance. »

Le schéma suivant illustre ce critère. Il faudra donc respecter une distance de 60 mètres entre le centre du digesteur et la plus proche habitation. Les 10 mètres ajoutés correspondent au rayon du digesteur. Ces 10 mètres majorent les valeurs des rayons des digesteurs trouvés par le biais de la recherche bibliographique.

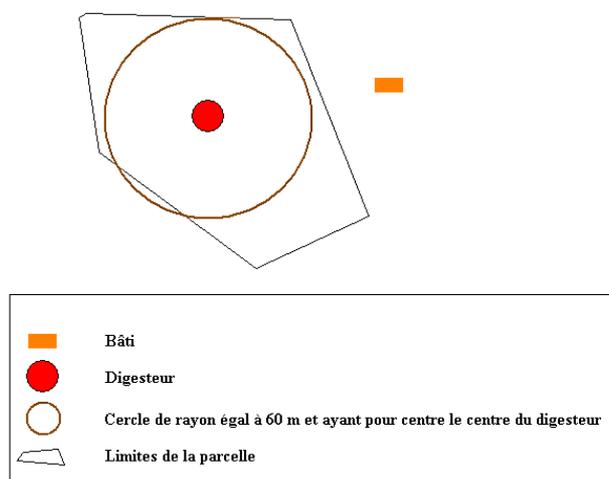


Figure 18: Illustration du critère de distance à la plus proche habitation

Parmi toutes les parcelles susceptibles d'accueillir une unité de méthanisation, seul un certain nombre sera retenu. Il faudra ainsi retenir une seule parcelle pour le scénario à une usine, deux parcelles pour le scénario à deux usines et ainsi de suite. Les parcelles finales répondront à d'autres exigences. Afin de sélectionner les parcelles finales différentes pistes sont envisageables. Tout d'abord éliminer les parcelles éligibles qui pourraient être trop éloignées du milieu urbain suffisamment dense. Choisir des parcelles trop éloignée rendrait la mise en place d'un réseau de chaleur impossible. Ensuite, le choix des parcelles dans le cas de plusieurs unités de méthanisation peut être fait dans le but d'obtenir des situations différentes d'un point de vue urbanistique. Par exemple, choisir une parcelle près d'un lotissement et une autre près d'un grand ensemble si les parcelles éligibles le permettent. Enfin le choix des parcelles finales devra se faire en respectant une certaine homogénéité dans la répartition des parcelles sur le territoire dans le cas des scénarios à plusieurs unités de méthanisation.

iv) Détermination des zones de collecte de déchets et de distribution potentielle de la chaleur

Une fois les parcelles finales déterminées pour chaque scénario, on construit les zones de collecte de déchets pour chaque usine de chaque scénario en utilisant un réseau sur lequel les déchets sont répartis. La zone de collecte de déchets d'une usine est l'ensemble du bâti qui sert à alimenter en déchets une usine. On construit aussi les zones de distribution de chaleur de chaque unité de méthanisation en utilisant un réseau sur lequel les besoins en chauffage sont aussi répartis. Ces zones de distribution ne constitueront pas des réseaux de chaleur à proprement parlé, mais des zones permettant

de se rendre compte de l'espace urbain potentiellement chauffé par la méthanisation. La taille des zones de collecte dépend de la quantité de déchets considérée, celle des zones de distribution de la quantité de chaleur que l'on peut distribuer. Par conséquent, dans un scénario à 4 usines les zones seront plus petites que celles d'un scénario à 2 usines.

On pourra alors analyser les différents scénarios. L'établissement de ces zones permettra ainsi de déterminer quel scénario minimise les distances pour effectuer la collecte. On pourra également comparer les zones de collecte de déchets et les zones de distribution de chaleur pour une même usine. Cette dernière comparaison se fera sur la surface de ces zones. Enfin, on pourra comparer l'insertion urbaine des différents scénarios.

3.3 Offre récupération de la chaleur des eaux usées :

a) Généralités sur la récupération de chaleur des eaux usées

D'après l'Institut Français pour l'Environnement (IFEN), chaque français rejette environ 150 litres d'eaux usées par jour. L'ensemble des eaux usées s'écoule dans le réseau d'assainissement avec une température oscillant entre 13 et 20°C au cours de l'année. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, ces températures sont suffisantes pour récupérer l'énergie thermique de l'eau. Les eaux usées sont alors refroidies et la chaleur ainsi prélevée permet de chauffer des bâtiments. La récupération de la chaleur de ces eaux repose sur une technologie simple et écologique, illustrée par la figure 19. Le cœur du dispositif est constitué par un échangeur thermique qui capte l'énergie des eaux usées et une pompe à chaleur qui réchauffe l'eau du réseau de chaleur. Un fluide appelé fluide caloporteur se réchauffe en circulant en circuit fermé dans un tuyau en contact avec l'échangeur de chaleur. Cet échangeur permet non seulement de récupérer l'énergie thermique des eaux usées, mais garantit également une séparation entre les eaux usées et le fluide caloporteur. Une chaufferie est installée à proximité des bâtiments à chauffer et contient une ou des pompes à chaleur. Celle-ci permet de tirer profit de l'énergie récupérée des eaux usées en élevant la température du fluide circulant dans le réseau de chaleur à un niveau exploitable. Ces pompes à chaleur permettent d'atteindre des températures d'utilisation de 50 °C à 70 °C dans le réseau de chaleur.

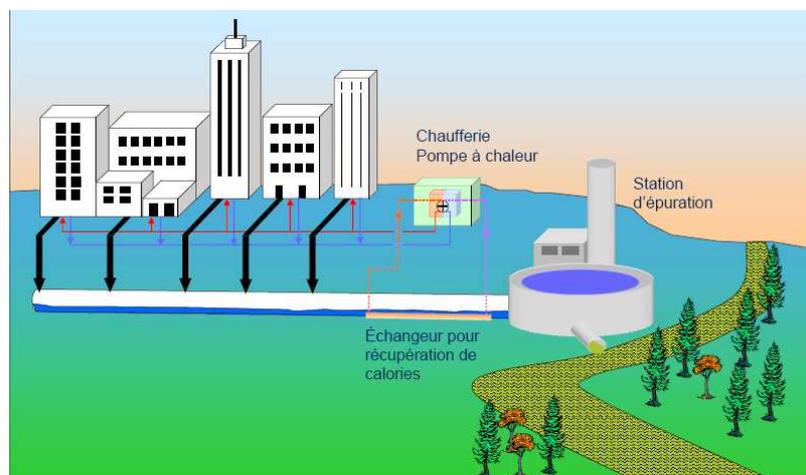


Figure 19: Fonctionnement d'une unité de récupération de chaleur des eaux usées (Source : Lyonnaise des Eaux)

Deux cas de figure existent pour les réseaux de chaleur approvisionnés par la chaleur issue des eaux usées. Soit le réseau de chaleur est totalement alimenté par la chaleur récupérée des eaux usées, soit la chaleur provenant des eaux usées ne constitue qu'une partie de la source qui chauffe l'eau du réseau de chaleur. Le premier cas de figure est très peu répandu du fait qu'il est alors très difficile de gérer les pics de consommation, à moins que le nombre de bâtiments chauffés soit faible. Dans la plupart des cas, la chaleur provenant des eaux usées correspond à 33% de la chaleur distribuée par le réseau de chaleur. Le reste provient d'une autre source. La chaleur provenant des eaux usées assure la base des consommations des bâtiments pour le chauffage et les pics sont gérés par l'autre source. On peut par exemple utiliser une chaudière bois pour compléter les 33%.

D'après Suisse Energie, société spécialisée dans cette technologie, la chaleur pouvant être transmise dans le réseau de chaleur est définie par :

$$Q = \text{Puissance d'échange} * \text{Période de chauffe} = \text{Débit} * 8 * \text{Période de chauffe}$$

Cette formule est correcte uniquement si le débit d'eaux usées est constant tout au long de l'année. Dans le cas inverse, la puissance d'échange varie à chaque fois que le débit change.

Lorsque le débit est constant, la même quantité de chaleur est fournie chaque heure au réseau de chaleur. Le débit d'eaux usées doit être au minimum de 15 litres par seconde pour que la technologie soit exploitable. De plus cette formule est basée sur un refroidissement des eaux usées de 3°C et sur un coefficient de performance (cop) de 4 pour la pompe à chaleur. Enfin, cette formule est valable dans le cas où la chaleur récupérée des eaux usées constitue 33% de la chaleur distribuée par le réseau de chaleur.

La longueur de l'échangeur dépend du débit et de la puissance par m² d'échangeur. Celle-ci est comprise entre 1,5 et 4,5 kW par m² selon les installations.

Ce type de dispositif peut être installé dans les canalisations existantes à condition qu'elles aient un diamètre minimum de 80 cm ou plus aisément dans les nouvelles canalisations.

Le dispositif peut être mis en place dans les canalisations où le débit est suffisant. De multiples localisations seront donc possibles au sein du réseau d'assainissement. Il faudra cependant veiller à ce que les eaux usées ne soient pas trop refroidies avant qu'elles arrivent en station d'épuration. Dans le cas contraire, certains traitements en station seront inefficaces. L'autre solution consiste à mettre en place le dispositif en sortie de station d'épuration ce qui ne pose plus de problèmes concernant la température de l'eau.

b) Mise en place d'un modèle

i) Nécessité de modéliser le problème

Comme on l'a vu précédemment les unités de récupération de chaleur des eaux usées peuvent être mise en place à partir d'un débit moyen de 15 litres par seconde. Cependant

ce type d'installation produit des quantités de chaleur inférieures au GWh par an ce qui limite la mise en place d'un réseau de chaleur. Des unités de récupération de chaleur des eaux usées ayant un débit 3 fois plus important paraissent plus pertinents.

Ainsi, le modèle théorique aura pour but de déterminer le nombre de récupérateurs de chaleur dimensionné à 45 litres par seconde pouvant être inséré dans un milieu urbain donné, de déterminer leur localisation au sein de ce milieu urbain et ainsi déterminer le potentiel énergétique de cette technologie. Comme on l'a vu précédemment, différentes localisations sont possibles pour récupérer cette chaleur mais celles-ci sont difficilement modélisables dans le cas d'un milieu urbain complet. La localisation en sortie de station d'épuration serait la moins complexe car il n'y aurait pas de contrainte au niveau débit et du refroidissement des eaux usées. Cette localisation paraît cependant peu pertinente du fait de l'éloignement entre les stations d'épuration et les habitations, ce qui rendrait alors trop complexe la mise en place d'un réseau de chaleur. L'autre principe de localisation consiste à mettre des échangeurs de chaleur là où le débit est suffisant dans le réseau et où l'eau n'a pas encore été refroidie. Cependant il est impossible de connaître les débits d'eaux usées dans toutes les canalisations d'un réseau et il est également difficile de se procurer le réseau d'assainissement d'un milieu urbain donné. On ne peut donc pas modéliser de cette manière. Il est donc nécessaire de trouver une autre solution afin de répondre à ce problème.

ii) Mise en place de réservoirs au sein de l'espace urbain

La solution retenue est de mettre en place des réservoirs d'eaux usées qui auront l'autonomie d'une journée afin d'alimenter avec un débit constant suffisant une canalisation en sortie de réservoir. Cette canalisation sera donc équipée d'un échangeur thermique. Le principe de cette méthode est de séparer le milieu urbain en N zones de collecte d'eaux usées de même taille. Chaque zone aura alors un réservoir. Le nombre N de réservoirs dépend quant à lui du nombre d'habitants présent dans l'espace urbain considéré. Cette séparation en N zones est pertinente puisque l'on sait qu'il n'est pas possible de refroidir les eaux usées plus d'une fois avant leur arrivée en station d'épuration. Prenons l'exemple d'un milieu urbain où le débit d'eaux usées est globalement de 270 litres par seconde en moyenne sur la journée. Il est alors possible de séparer ce milieu urbain en 6 zones égales du point de vue du nombre d'habitants. Dans chaque zone, l'ensemble des eaux usées sera alors acheminée vers le réservoir. En sortie de réservoir, le débit sera alors de 45 litres par seconde ($270/6$). Afin d'obtenir ce débit constant en sortie, il suffit de remplir le réservoir pendant une journée sans faire sortir d'eau. Le deuxième jour il sera alors possible de faire sortir du réservoir 45 litres d'eau par seconde. Le niveau d'eau du réservoir variera du fait que les rejets d'eaux usées des habitants ne sont pas continus au cours de la journée mais le réservoir sera toujours capable de fournir 45 litres par seconde en sortie. Il faut avoir conscience que cette solution a pour but de modéliser le problème et de déterminer le potentiel en production de chaleur par cette technique dans un milieu urbain. Par conséquent, dans la réalité ces réservoirs ne seront probablement pas construits. En effet, dans un cas réel, des mesures de débits dans les canalisations seront effectuées afin de savoir s'il est possible ou non de mettre en place une unité de récupération de chaleur et on vérifiera de même la température de l'eau.

iii) Choix d'une localisation au sein d'un milieu urbain pour ces unités de récupération de chaleur des eaux usées

Afin de modéliser ces réservoirs, il est nécessaire d'identifier des parcelles libres qui pourront les accueillir au sein d'un milieu urbain donné. Les espaces urbains susceptibles d'accueillir les récupérateurs de chaleur avec leur réservoir doivent répondre aux exigences suivantes. La première exigence concerne la constructibilité de la parcelle. En effet pour installer ce type de dispositif sur une parcelle, il faut que celle-ci soit constructible d'après le classement du PLU. Le second critère concerne l'inondabilité de la parcelle. Il serait en effet préférable de construire les réservoirs en zone non inondable même s'il serait envisageable de les construire là où les aléas ne sont pas forts (aléa 1 et 2). Ensuite, le troisième critère concerne la forme de la parcelle. Il faut que la parcelle qui accueille le dispositif possède une certaine longueur incluse dans la parcelle. Cette longueur nécessaire pour implanter le réservoir et l'échangeur dépend de la longueur d'échangeur thermique que l'on souhaite installer. Cette longueur est conditionnée par le débit d'eaux usées qui lui-même conditionne la puissance d'échange de l'échangeur thermique que l'on peut installer dans la canalisation. Dans le cas d'un débit de 45 litres par seconde, la puissance d'échange est de 360kW. Cette puissance est toujours mobilisée puisque le débit reste constant. Or on a vu dans la partie descriptive de la technique que les puissances d'échange par m² d'échangeur sont comprises entre 1,5 et 4,5kW. Pour une canalisation de 1 mètre de diamètre recouverte par un échangeur de chaleur sur un tiers de sa circonférence, il y a 1m² d'échangeur à chaque mètre linéaire. Donc si l'on prend une valeur moyenne de 3kW, la longueur linéaire de l'échangeur sera de 120 mètres. Pour assurer l'implantation du réservoir et de l'échangeur, la parcelle accueillant le dispositif devra alors posséder une longueur de 200 mètres incluse. La dernière exigence concerne la surface de la parcelle. Cette exigence a pour but de ne pas se retrouver avec des parcelles ayant une longueur incluse de 200 mètres et une largeur moyenne de quelques mètres seulement. La combinaison de ces deux conditions implique que les parcelles susceptibles d'accueillir le dispositif aient une surface de 4000 m² au minimum. La combinaison des critères de surface minimale et de plus grande longueur incluse dans la parcelle permet de sélectionner des parcelles dont la forme sera en adéquation avec l'utilisation que l'on veut en faire.

Parmi toutes les parcelles susceptibles d'accueillir le dispositif, seul un certain nombre d'entre elles seront retenues. Le nombre N de parcelles à choisir est défini par :

$$N = \frac{\text{Nombre d'habitants} \times \text{Production journalière d'eaux usées par habitant}}{\text{Nombre de secondes dans une journée} \times \text{Débit en sortie de réservoir}}$$

Les parcelles finalement choisies répondront à d'autres exigences. Différentes pistes sont envisageables. Tout d'abord éliminer les parcelles éligibles qui pourraient être trop éloignées d'un milieu urbain suffisamment dense. En effet, choisir des parcelles trop éloignées, rendrait la mise en place d'un réseau de chaleur impossible. Ensuite, le choix des parcelles peut être fait dans le but d'obtenir des situations différentes d'un point de vue urbanistique. Par exemple, choisir une parcelle près d'un lotissement et une autre près d'un grand ensemble si les parcelles éligibles le permettent. Enfin le choix des parcelles finales devra se faire en respectant une certaine homogénéité dans la répartition des parcelles sur le territoire.

iv) Détermination des zones de collecte d'eaux usées et de distribution potentielles de chaleur

Les parcelles finales choisies, il est alors possible de déterminer les zones de collecte en eaux usées pour chaque réservoir en utilisant un réseau sur lequel les eaux usées produites par le milieu urbain sont réparties. Certaines zones de collecte n'auront peut-être pas de sens au niveau urbanistique du fait que l'on impose que toutes les zones de collecte aient le même nombre d'habitants sans prendre en compte la morphologie du territoire d'étude. Il sera peut-être nécessaire de réattribuer des parties pour que les zones aient un sens d'un point de vue urbanistique. Cela entraînera alors une variation sensible du débit pour les réservoirs concernés. Ces changements faits, on pourra alors définir les zones de distribution potentielles de chaleur basées sur les débits finaux en utilisant un réseau sur lequel les besoins en chauffage seront répartis. On pourra alors analyser les résultats ainsi obtenus en comparant par exemple les zones de collecte d'eaux usées et les zones de distribution potentielles de chaleur pour un même réservoir. Ces zones de distribution ne constitueront pas des réseaux de chaleur à proprement parlé mais des zones permettant de se rendre compte quels espaces urbains seraient potentiellement chauffés par les eaux usées.

4. Choix d'un indicateur de rentabilité des réseaux de distribution de chaleur

Nous avons pris le parti de ne pas chercher à estimer le coût de construction des réseaux de chaleur urbain. En effet, ce coût dépend de la technologie utilisée, à savoir réseau à vapeur d'eau, réseau eau chaude à haute ou basse pression, mais aussi, et surtout, du milieu urbain dans lequel on se trouve. En effet, les prix varient énormément selon que l'on se trouve dans un milieu urbain dense, type centre-ville, ou dans une petite ville ou une zone en cours d'aménagement, auquel cas la création du réseau de chaleur peut se faire en même temps que la viabilisation des terrains. Le coût dépend aussi de la politique de la ville et des aides accordées par les collectivités locales. Pour toutes ces raisons, nous avons décidé de ne pas chercher à déterminer le coût de construction pour savoir s'il était pertinent ou non de construire un réseau plutôt qu'un autre.

4.1 La densité thermique

Nous avons choisi la densité thermique comme indicateur de rentabilité, la rentabilité économique dépendant entre autres de celle-ci. La densité dépend de la longueur du réseau et de la quantité de chaleur qu'il transporte, elle permet de caractériser l'étalement du réseau. Elle ne prend pas en compte directement la forme urbaine, cependant, plus un espace est dense, moins la longueur de réseau sera importante à priori, on peut donc estimer qu'un réseau a plus de chance d'être rentable s'il se trouve en milieu urbain à forte densité, type centre historique, que s'il se situe dans une zone pavillonnaire.

Pourtant, la présence d'un équipement consommant une quantité importante de chaleur peut facilement rendre rentable du point de vue énergétique un réseau de chaleur en milieu peu dense. Ainsi, en milieu rural, si des équipements comme la mairie, la salle

des fêtes et l'école se trouvent à proximité les uns des autres, il peut être intéressant de mettre en place un réseau de chaleur qui peut aussi desservir des logements présents dans le centre-bourg.

4.2 Seuils de rentabilité

Pour déterminer si un réseau est rentable, nous utiliserons deux seuils. Tout d'abord celui de l'Ademe, qui est de 1,5 MWh par mètre linéaire de réseau. C'est la densité thermique minimale à atteindre pour pouvoir bénéficier du fonds chaleur. Ce fonds a été mis en place dans le cadre du plan national de développement des énergies renouvelables. Il bénéficie de 960 millions d'euros pour la période 2009-2011 et permet de financer, entre autre, la création ou l'extension de réseaux de chaleur jusqu'à 60 % de l'assiette du projet à condition que le réseau soit alimenté au moins à 50 % par des sources d'énergies renouvelables et de récupération. Nous nous situons dans ce cadre puisque nos réseaux seront alimentés à 100% par des sources d'énergies renouvelables et de récupération.

Le deuxième seuil est de 3 MWh par mètre linéaire. Dans les faits, il est conseillé de n'entreprendre la construction d'un réseau de chaleur que si la densité thermique est au moins égale à ce seuil. Les professionnels considèrent qu'il s'agit du seuil minimum pour assurer la rentabilité économique d'un projet de réseau de distribution de chaleur. Si ce seuil est atteint relativement facilement en milieu urbain dense, où les valeurs de densité thermique sont souvent aux alentours de 4 à 5 MWh/ml, ce n'est pas le cas en milieu rural où les valeurs sont plutôt de 1,5 à 2 MWh/ml. Il n'est pas rare de trouver des réseaux ayant une densité allant de 800 à 1500 kWh/ml, mais avec le fonds chaleur cela devrait devenir de plus en plus rare.

PARTIE 2
MISE EN ŒUVRE
OPERATIONELLE DE L'OUTIL

Dans cette partie nous allons expliciter le processus opérationnel que nous avons suivi afin de mettre en œuvre la partie théorique évoquée précédemment.

Nous allons tout d'abord aborder tout ce qui concerne les données créées sous SIG afin de répondre aux critères de localisations des unités de production de chaleur, aux calculs des besoins de chauffage et à la nécessité de construire un réseau permettant la création de zones de collecte de matière et de distribution de chaleur.

Ensuite nous verrons comment l'offre et la demande utiliseront ces données pour répondre à ce qui a été exposé dans la partie théorique.

1. Les avantages d'une modélisation en SIG

La question que l'on peut se poser est de savoir si l'utilisation d'un SIG en tant que complémentaire d'un outil de calcul matriciel peut être adaptée dans une problématique de création de réseaux de chaleur à l'échelle d'une unité urbaine. L'hypothèse sera de dire qu'un SIG peut être le bon complémentaire d'un outil de calcul matriciel sur une telle problématique. Cette hypothèse sera alors validée ou non à la fin du travail sous SIG.

1.1 L'utilisation d'un SIG dans une modélisation énergétique territorialisée

Pour traiter de ce sujet, il est nécessaire d'obtenir de nombreuses données chiffrées et cartographiées. Or ces données sont de natures très différentes mais également à des échelles allant de la parcelle à la commune. Il faut donc utiliser une interface permettant de traiter toutes ces différentes informations. La solution retenue est l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour pouvoir charger et traiter les données.

a) La définition d'un SIG

Plus généralement, on peut définir un SIG comme étant « *un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées.* » (F. de Blomac, 1994)¹

Le SIG est un réel support faisant l'interface entre un aménageur et de la donnée et permettant :

- de valoriser la donnée,

¹ Définition de F. de Blomac sur le site <http://www.unice.fr/geonet/def.htm>

- de créer de nouvelles données à valeur ajoutée¹,
- de structurer les données.

Il faut par contre savoir qu'un SIG ne peut refléter le territoire dans son intégralité car le territoire est un élément vivant. Même en accumulant de nombreuses couches d'informations géographiques, il existe des paramètres qui ne peuvent être pris en compte avec les SIG. L'utilisation d'un SIG permet donc de travailler sur un territoire dématérialisé, mais le travail qui va être réalisé sera toujours soumis à des approximations du fait du manque de données, de la non prise en compte de paramètres aléatoires ou de la précision des données. Malgré tout, l'utilisation d'un SIG pour pouvoir modéliser notre problème reste la meilleure solution qui soit.

b) Quel logiciel de SIG choisir pour réaliser la modélisation?

Les deux logiciels de SIG les plus utilisés en France par les collectivités sont :

- Mapinfo dont la société de production Claritas est le leader des SIG en France,
- ArcGIS d'ESRI (ArcView étant la version de base) qui est le leader mondial historique du marché du SIG.

Notre formation d'Ingénieur en Aménagement du Territoire nous permet de maîtriser le logiciel de SIG ArcGIS et également d'avoir quelques connaissances de base du logiciel Mapinfo. Nous avons ainsi fait le choix d'utiliser le logiciel ArcGIS pour réaliser notre étude. Notre formation à ce logiciel nous permet de maîtriser une grande partie des outils qui nous seront nécessaires pour réaliser notre étude. Pour information, ArcGIS possède cinq modules différents mais le module ArcMap servant à analyser des données et à réaliser des produits cartographiques sera le module que nous utiliserons principalement.

c) A qui s'adresse ce guide méthodologique cartographique?

L'étude a été réalisée pour pouvoir être utilisée par n'importe quelle collectivité et ainsi pouvoir l'appliquer à leurs terrains d'études respectifs.

En France, le marché de l'information géographique est en croissance de 10 à 15% sur ces dernières années², mais c'est l'Etat et les collectivités locales qui représentent la plus grande proportion de la demande actuelle avec plus de 70%. Les collectivités sont donc de plus en plus sensibilisées à la question des SIG et voient depuis quelques temps le

¹ Gasc A., Pieniek Agata, Revillet E., PFE : *les Systèmes d'Information Géographique (SIG), quels impacts dans les pratiques d'aménagement du territoire ?*, 2009-2010, 131p.

² Source : <http://sigfrance.free.fr>

potentiel que cela peut leur apporter. Les collectivités s'équipant de plus en plus, notre étude s'inscrit donc bien dans cette dynamique et elle pourra ainsi toucher un large public averti.

Par ailleurs, la partie de programmation sous le logiciel de calcul matriciel n'aura besoin d'aucunes modifications de la part des collectivités souhaitant utiliser l'outil méthodologique créé. Il suffira donc simplement d'avoir des connaissances en SIG pour pouvoir pleinement manipuler cet outil. Le travail pourra ainsi être reproduit par un expert SIG au sein de la collectivité pour laquelle il travaillera. Il aura simplement alors à suivre les étapes ce guide méthodologique cartographique.

Pour la partie sur la production de données par une modélisation sous SIG, la méthodologie cartographique s'appuiera sur l'exemple de l'utilisation du logiciel ArcGIS et des outils associés à ce logiciel. Si les collectivités utilisent d'autres logiciels que ArcGIS, il faut savoir que les outils utilisés et détaillés dans le rapport possèdent leurs équivalents dans les autres logiciels de SIG. Ainsi, le guide méthodologique cartographique créé pourra être utilisé par n'importe quelle collectivité voulant appliquer notre outil.

d) Quelles sont les limites de ce guide méthodologique cartographique?

Mais l'utilisation de cet outil et de son potentiel dépendront surtout des ressources qui seront à disposition de la collectivité en question. Le manque de données est ici un réel obstacle.

Les collectivités françaises ont toutes accès aux mêmes bases de données nationales (INSEE, IGN...), mais certaines bases de données sont créées en dehors des ressources d'ordre national et permettraient ainsi une modélisation du problème encore plus simple. C'est le cas par exemple à Tours où la Maison des Sciences de l'Homme a créé en 2008 une base de données : la BD TOPO MSH 2008. Cette BD compile de nombreuses données géoréférencées sur le périmètre du SCoT de l'Agglomération Tourangelle (périmètre supérieur à notre territoire d'étude) : réseaux, bâti, données économiques et administratives...

Enfin, nous avons choisi des sources d'énergie spécifiques à notre territoire d'étude, c'est-à-dire la méthanisation des déchets putrescibles, la récupération de la chaleur des eaux usées ainsi que le chauffage par le bois. Or, dans d'autres régions françaises, il est possible qu'une ou plusieurs de ces sources d'énergie ne soient pas pertinentes, alors que d'autres sources d'énergie peuvent être plus adéquates.

La méthodologie globale à appliquer serait la même, mais il faudrait développer d'autres critères de sélection des parcelles pouvant accueillir ces autres modes de chauffage. Ces nouvelles conditions impliqueraient donc de nouvelles bases de données à obtenir, de nouveaux outils à utiliser et ainsi de compléter le guide méthodologique cartographique.

1.2 La production et la représentation des données par une modélisation sous SIG

a) L'articulation de la modélisation des données sous SIG dans le projet

La partie cartographique vient en amont du travail de sélection des parcelles par le logiciel de calcul matriciel. Dans la partie 1, des conditions et des contraintes ont été définies permettant de réaliser cette sélection. Le travail consiste donc à établir des tables de données puis de réaliser le transfert du logiciel cartographique vers l'interface du logiciel de calcul matriciel.

Le schéma suivant montre à quel niveau le travail de production des données sous le logiciel de SIG intervient dans l'organisation globale du travail:

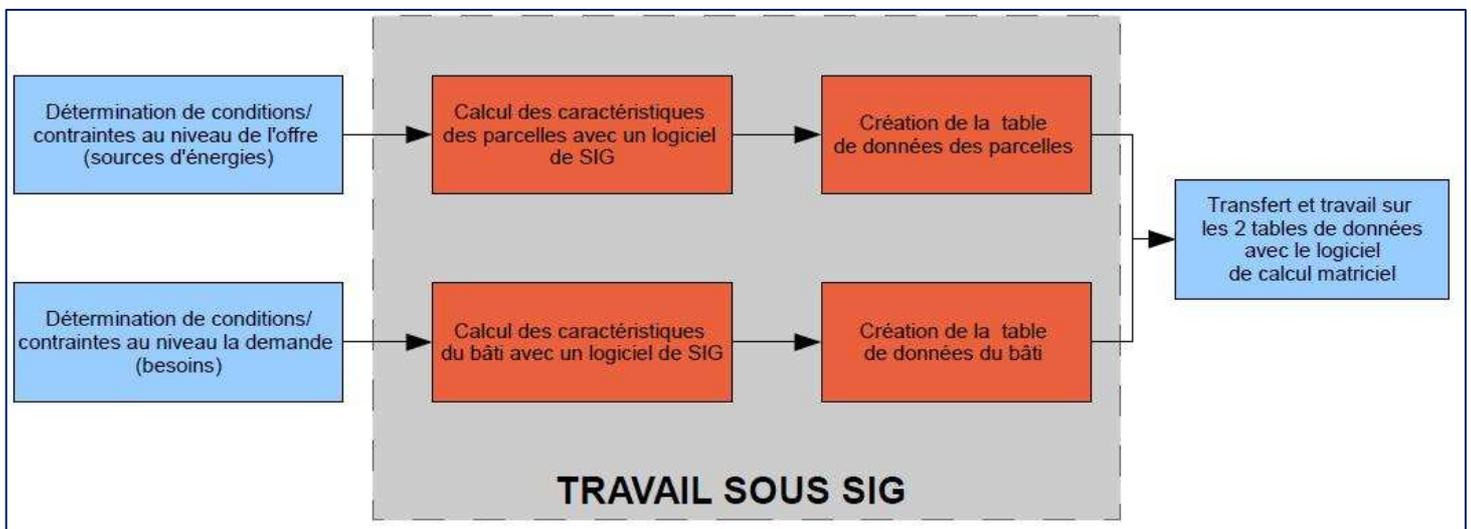


Figure 20: Schéma d'articulation du travail au niveau de la partie production de données sous SIG

Le logiciel de SIG permet également de représenter les résultats finaux, c'est-à-dire les cartographies des consommations énergétiques, des sélections de parcelles, des zones de production et de la distribution de l'énergie. Il existera donc un travail de cartographie sous SIG à réaliser en aval du projet.

b) Les objectifs de la modélisation sous SIG

Le but de l'étude est de pouvoir utiliser cet outil méthodologique sur n'importe quelle ville. Le travail sous le logiciel de SIG ne consiste donc pas simplement à cartographier certaines données, mais plus largement à créer une méthodologie sous forme d'étapes pour que la collectivité qui souhaite utiliser cet outil sache :

- quelles données récupérer pouvant servir à notre étude et où les récupérer,
- quelles hypothèses faire pour simplifier le problème tout en gardant une modélisation la plus réaliste possible,
- comment cartographier certaines données pour voir ce qui se passe à l'état initial sur le terrain d'étude,
- comment calculer certaines données avec le logiciel de SIG (quels outils du logiciel utiliser),
- comment formaliser de manière automatique tous ces résultats en entrée d'un logiciel de calcul matriciel,
- cartographier les résultats en sortie du logiciel de calcul matriciel (consommations énergétiques par bâtiment, sélection des parcelles éligibles pour les techniques par méthanisation, pour les chaufferies bois et pour les unités de récupération de chaleur des eaux usées...).

2. La structuration de la base de données spatialisée

La création de ces deux bases de données spatialisées fait suite à la détermination de conditions, de contraintes et de paramètres qui ont été déterminés dans la partie 1 de l'étude. Cette partie détaille donc l'obtention de ces données pour répondre aux questions de l'estimation de l'offre en chauffage et de la demande par l'installation d'unités de production de chaleur.

Pour faciliter la compréhension des étapes de création de ces bases de données, l'exemple de l'application au territoire du Noyau Urbain de Tours a été réalisé. Mais la démarche reste parfaitement reproductible sur n'importe quel autre territoire.

2.1 Objectifs de la partie

Deux typologies différentes à mettre en entrée du logiciel de calcul matriciel sont à construire :

- Une base de données répondant aux contraintes et conditions pour déterminer la demande : construction d'une typologie du bâti.
- Une base de données répondant aux contraintes et conditions pour déterminer l'offre : construction d'une typologie de parcelles.

Ces typologies doivent permettre par la suite de sélectionner les parcelles potentiellement éligibles à l'implantation d'unités de production de chaleur (typologie des parcelles) et de déterminer les besoins en chauffage par bâtiment (typologie du bâti).

L'objectif est donc de déterminer des caractéristiques propres à chaque parcelle et à chaque bâti. Pour chacune de ces caractéristiques sera alors décrit:

- la définition de la variable : les contraintes nécessaires pour la sélection des parcelles et du bâti.
- le nom de la variable : le nom donné à la variable dans le logiciel de SIG.
- le type de données : Id, booléen, numérique ou texte.
- quelle utilité aura cette donnée : savoir pour quelle partie la donnée va être utilisée.
- les hypothèses : quelles hypothèses ont été réalisées pour obtenir les données (simplification, choix des données, calculs réalisés...).

2.2 Base de données répondant à la question de la demande en énergie

a) Quelles données et contraintes souhaite-t-on?

Cette typologie a pour but d'obtenir des tables de données avec, pour chaque bâti de l'unité urbaine choisie, toutes les caractéristiques qui lui sont attachées.

On souhaite donc obtenir pour chaque bâti :

- sa surface habitable : permet de connaître la surface à chauffer du bâti.
- son périmètre extérieur: permet de savoir quelle est la surface de déperdition de la chaleur vers l'extérieur.
- sa hauteur : permet de calculer les besoins en chauffage.
- sa population: sert dans le calcul des apports internes ainsi que pour savoir le nombre de déchets et quantité d'eaux usées émis par bâtiment.
- le pourcentage d'occurrence des différentes combinaisons (âge du bâti/type de chauffage/type de combustible) : cela permet d'avoir pour chaque bâti une précision à l'échelle de l'IRIS quant à son âge, son type de chauffage et son type de combustible

Le tableau suivant compile ces différentes informations :

Définition variable	Nom variable	Type	Source	Quelle utilité?	Hypothèses
Numéro bâti	FID	Id	BD TOPO MSH 2008 BD Cadastre 2008	Calcul des besoins	On ne considère que les bâtiments chauffés (donc pas d'industries, d'églises...). Les commerces en rez-de-chaussée et les bureaux ont été considérés comme des logements.
Surface habitable du bâti	SURF_HAB	Numérique	BD TOPO MSH 2008	Calcul des besoins	Elle correspond à la surface au sol du bâti que l'on multiplie par le nombre de paliers du bâti.
Périmètre extérieur du bâti	PERIMETRE	Numérique	BD TOPO MSH 2008	Calcul des besoins	Dans le calcul du périmètre on ne tient pas compte des cloisons mitoyennes car on mesure les déperditions des surfaces en contact avec l'extérieur.
Hauteur du bâti	HAUTEUR	Numérique	BD TOPO MSH 2008	Calcul des besoins	Avec la hauteur du bâti, on estimera qu'un palier fait 3m de haut pour déterminer le nombre de paliers de l'immeuble.
Population par bâti	POP_BATI	Numérique	BD TOPO MSH 2008 Données INSEE 2006 par IRIS	Calcul des besoins, Méthanisation	La population a été répartie par IRIS proportionnellement à la surface habitable calculée de chaque bâti.
Pourcentage d'occurrence (âge/type chauffage/type combustible)	14 colonnes: [de ACHL1 à ACHL7] ; [de ACHL1 R à ACHL7 R]	Numérique	Données INSEE 2006 (par IRIS et par commune)	Calcul des besoins	Les 7 périodes choisies sont celles définies par l'INSEE. Ces valeurs sont à l'échelle de l'IRIS. On tient compte des rendements (R) moyens des installations de chauffage.

Figure 21: Tableau des données nécessaires pour la typologie du bâti

b) Fabrication de la typologie des bâtis par étape

Étape 1 : Récupération des données

La BD TOPO® (RGE) 2008 : c'est une des bases de données de l'IGN contenant une description d'éléments du paysage en 3D sous forme de vecteurs de précision métrique et selon plusieurs thématiques¹. La base de données que l'on a utilisée provient de la Maison des Sciences de l'Homme (MSH) qui a apporté des modifications à la BD TOPO® (RGE) 2008 et lui a donné le nom de BD TOPO MSH 2008.

La BD Cadastrale SCoT 2008 : c'est une des bases de données de la Direction Générale des Finances Publiques (DGFP). Cette base de données fait partie du Plan Cadastral Informatisé, version informatisée des planches cadastrales. Les collectivités peuvent demander l'obtention de la BD Cadastrale auprès des services départementaux des Finances Publiques. Cette base de donnée est mise à jour tous les ans.

Les données INSEE 2006 : le site de l'INSEE possède de nombreuses bases de données, dont des données à une échelle spécifique : l'échelle de l'IRIS. Ces données à l'échelle de l'IRIS permettent d'avoir des informations beaucoup plus précises qu'à la commune, et cela est possible du fait que les communes étudiées sont à forte densité urbaines et donc divisées en plusieurs IRIS (101 IRIS sur notre application territorialisée).

Base de données	Données utilisées
BD TOPO MSH 2008	Communes
	Bâti indifférencié
BD Cadastrale SCoT 2008	Bâti cadastrale
Données INSEE 2006	Les IRIS sur le SCoT de l'Agglomération Tourangelle
	Population par IRIS
	Les caractéristiques des logements par IRIS et par commune (âge du bâti/type de chauffage et type de combustible)

Figure 22: Tableau montrant les différentes données utilisées, issues de bases de données

Étape 2:

Opération: Sélection des données appartenant au Noyau Urbain de Tours.

Outil utilisé: « Sélection par localisation ».

Résultats: on obtient toutes les données utiles sur notre périmètre d'étude.

Étape 3:

Opération : Obtenir les caractéristiques des bâtis chauffés.

¹ Site de l'IGN

Outil utilisé : On dispose de deux bases de données différentes concernant le bâti : la BD TOPO 2008 et la BD Cadastre 2008. Or on dispose d'informations utiles dans chacune des deux bases de données:

- la hauteur des bâtis chauffés compris dans la couche des bâtis indifférenciés de la BD TOPO,
- un découpage précis au bâti dans la BD Cadastre alors que le découpage est par îlot dans la BD TOPO.

Pour pouvoir obtenir les caractéristiques par bâti chauffé alors on utilise l'outil « Intersect » (ArcToolbox/Analysis Tools/Overlay/Intersect) entre ces deux couches de bâtis.

Résultats : on obtient la hauteur de chaque bâtiment chauffé avec un découpage réalisé au bâti. On obtient une base de données de 75 537 bâtiments pour l'exemple de Tours.

Cette couche aura pour nom LB1 (Listing Bâti 1).

Étape 4 :

Opération : détermination des caractéristiques géométriques des bâtis.

Outil : utilisation de l'outil « Ajouter infos géométries » sur la couche LB1.

Résultats : on obtient la superficie et le périmètre¹ de chaque bâti.

Cette couche aura pour nom LB2 (Listing Bâti 2).

Étape 5 :

Opération : détermination du nombre d'habitant par bâtiment. Pour cela, on réalise une répartition de la population de chaque IRIS proportionnelle à la surface habitable de chaque bâtiment.

Outil : On réalise tout d'abord une jointure entre la couche des IRIS et le tableau de données de la population par IRIS.

Puis, on fait l'intersection (outil « Intersect ») entre la couche LB2 et la couche des IRIS pour définir dans quel IRIS chaque bâti se trouve.

Ensuite, en fonction de la hauteur des bâtiments, on détermine le nombre de paliers du bâtiment en faisant l'hypothèse que chaque palier mesure 3m de haut. On multiplie alors ce nombre de paliers par la surface du bâtiment pour obtenir la surface habitable du bâtiment.

On réalise une fusion des bâtiments par IRIS pour déterminer la surface habitable totale dans chaque IRIS.

On peut alors déterminer la population dans chaque bâtiment par le calcul suivant :

Population du bâti = (Population de l'IRIS*Surface habitable du bâti)/Surface habitable totale de l'IRIS.

Résultat : on obtient la population de chaque bâtiment.

Cette couche aura pour nom LB3 (Listing Bâti 3).

¹ Le périmètre extérieur (sans les cloisons mitoyennes) n'a pu être calculé suite à des problèmes techniques, mais le calcul avec le périmètre total reste tout à fait pertinent si les réseaux de chaleur créés se trouvent en périphérie dans des quartiers de maisons individuelles où le périmètre extérieur est égal au périmètre total (ce sont les besoins des bâtis compris dans les réseaux de chaleur qui seront utiles).

Étape 6 :

Opération : Ajout des caractéristiques des logements (âge du bâti, type de chauffage et type de combustible).

Outil : Pour réaliser cela, il faut passer par une manipulation dans un tableur. On dispose de deux sources de données différentes :

- Une base de données par IRIS où l'on a, pour chaque IRIS, le nombre de logements par classe d'âge de construction du logement. Il existe quatre classes d'âge de construction du bâti.
- Une base de données par commune où l'on dispose de toutes les caractéristiques (âge du bâti, type de chauffage et type de combustible) de chaque bâtiment du périmètre d'étude (autant de lignes dans le tableur que de bâtiment). Le seul problème est qu'il n'y a pas de géoréférencement associé à ces bâtiments.

On ne peut donc pas savoir pour un bâtiment donné quel est son âge, le type de chauffage et le type de combustible utilisé. Par contre, avec la base de données par commune, on peut savoir combien de bâtiments possèdent la combinaison : âge de bâti X/type de chauffage Y/type de combustible Z (réalisation d'un tableau croisé dynamique). Pour chaque commune, on peut donc obtenir un pourcentage pour chaque période de construction : on pourra donc dire que tel bâtiment est par exemple :

- à 20% de la période de construction1
- à 50% de la période de construction2
- et à 30% de la période de construction3

Mais cette précision reste à l'échelle de la commune. Or il existe de nombreuses différences dans la typologie des bâtiments des différents quartiers des communes d'étude. On ne peut pas appliquer par exemple les mêmes pourcentages aux bâtiments du centre-ville ancien de Tours et à ceux du tout nouveau quartier des 2 Lions. On va donc utiliser la base de données par IRIS pour «corriger» les pourcentages trouvés et ainsi obtenir une précision à l'échelle de l'IRIS. Il faut simplement faire attention à la correspondance entre les variables des deux bases de données.

	Echelle communale / données par bâtiment			Echelle IRIS / données par IRIS	
	Nom variable	Code INSEE	Signification code INSEE	Nom variable	Signification
Age du bâti	ACHL1	11	avant 1949	A1	avant 1949
	ACHL2	12	entre 1949 et 1974 inclus	A2	entre 1949 et 1974
	ACHL3	13	entre 1975 et 1981 inclus	A3	entre 1975 et 1989
	ACHL4	14	entre 1982 et 1989 inclus		
	ACHL5	15	entre 1990 et 1998 inclus	A4	entre 1990 et 2003
	ACHL6	21+22+23+24+25+26+27	entre 1999 et 2005 inclus		
	ACHL7	28+29+30+9	de 2006 à 2008 inclus		
Type chauffage	CHFL1	1	central collectif	B1	central collectif
	CHFL2	2	central individuel (chaudière propre au logement)	B2	central individuel
	CHFL3	3	individuel électrique	B3	individuel électrique
	CHFL4	4	Autre moyen de chauffage (poêle, cheminée...)	Pas de données	
Type combustible	CMBL1	1	chauffage urbain	Pas de données	
	CMBL2	2	gaz de ville ou de réseau		
	CMBL3	3	fioul		
	CMBL4	4	électricité		
	CMBL5	5	gaz en bouteille ou en citerne		
	CMBL6	6	autre		

Figure 23: Tableau montrant les relations entre les variables des bases de données aux échelles communales et à l'IRIS

Par exemple, pour les IRIS de Tours : Centre1 et les 2 Lions-Gloriette, on obtient les pourcentages corrigés suivants :

Étude par commune (% des combinaisons possibles = Xi)					IRIS Tours Centre 1		IRIS Tours 2 Lions-Gloriette	
ACHL	CHFL	CMBL	Xi	$\sum Xi$	% des Ai	% corrigé : $Zi = Ai*Xi/(\sum Xi)$	% des Ai	% corrigé : $Zi = Ai*Xi/(\sum Xi)$
ACHL1	CHFL1	CMBL1	0,21%	19,30%	A1 = 61,21%	0,67%	A1 = 2,25%	0,02%
		CMBL2	1,15%			3,63%		0,13%
		CMBL3	0,27%			0,85%		0,03%
		CMBL4	0,07%			0,21%		0,01%
		CMBL5	0,03%			0,10%		0,00%
		CMBL6	0,03%			0,08%		0,00%
	CHFL2	CMBL2	10,92%			34,64%		1,27%
		CMBL3	0,63%			1,99%		0,07%
		CMBL4	0,30%			0,94%		0,03%
		CMBL5	0,06%			0,19%		0,01%
	CHFL3	CMBL4	5,33%			16,91%		0,62%
		CMBL6	0,03%			0,10%		0,00%
	CHFL4	CMBL2	0,06%			0,19%		0,01%
		CMBL3	0,03%			0,10%		0,00%
		CMBL4	0,09%			0,27%		0,01%
		CMBL5	0,02%			0,05%		0,00%
		CMBL6	0,10%	0,31%	0,01%			

Figure 24: Tableau montrant un exemple des pourcentages corrigés à l'échelle de l'IRIS

L'intérêt d'avoir travaillé dans un premier temps sur les données à la commune est que l'on va pouvoir prendre en compte la notion de rendement des installations de chauffage. Chaque combinaison Type de chauffage/Type de combustible, c'est-à-dire CHFL/CMBL, possède un rendement particulier décrit dans le tableau suivant :

Type de chauffage	Type de combustible	Rendement associé de l'installation
CHFL1	CMBL1	0,72
	CMBL2	0,68
	CMBL3	0,68
	CMBL4	0,86
	CMBL5	0,68
	CMBL6	0,54
CHFL2	CMBL1	0,80
	CMBL2	0,75
	CMBL3	0,75
	CMBL4	0,95
	CMBL5	0,75
	CMBL6	0,60
CHFL3	CMBL1	/
	CMBL2	/
	CMBL3	/
	CMBL4	0,95
	CMBL5	/
	CMBL6	/
CHFL4	CMBL1	/
	CMBL2	0,60
	CMBL3	0,60
	CMBL4	0,60
	CMBL5	0,60
	CMBL6	0,60

Figure 25: Tableau montrant les rendements associés à chaque combinaison type de chauffage/type de combustible

Le rendement de ses installations signifie qu'il faut fournir plus d'énergie en amont car le rendement n'est pas de 1. La valeur des pourcentages corrigés à l'échelle de l'IRIS correspondait aux besoins des bâtiments. Il suffit alors de réaliser l'opération : (%)

corrigé / rendement de l'installation) pour obtenir un pourcentage correspondant aux consommations des bâtiments.

On obtient donc des pourcentages prenant en compte les rendements des installations. Voilà on extrait des résultats obtenus :

Code INSEE	Code IRIS	Valeurs obtenues pour chaque période de construction (sans rendement / avec rendement)													
		ACHL1		ACHL2		ACHL3		ACHL4		ACHL5		ACHL6		ACHL7	
37050	370500101	3,71%	5,01%	27,40%	37,74%	19,75%	25,24%	13,97%	17,30%	19,30%	22,99%	13,09%	15,24%	2,77%	3,95%
	370500102	0,78%	1,05%	51,26%	70,61%	12,02%	15,36%	8,50%	10,53%	15,06%	17,94%	10,21%	11,89%	2,16%	3,08%
	370500103	1,99%	2,68%	33,76%	46,50%	21,69%	27,71%	15,34%	19,00%	14,95%	17,81%	10,14%	11,80%	2,15%	3,06%
	370500104	8,02%	10,81%	39,55%	54,48%	16,38%	20,92%	11,58%	14,34%	13,43%	16,00%	9,11%	10,61%	1,93%	2,75%

Figure 26: Tableau montrant les rendements associés à chaque combinaison type de chauffage/type de combustible

Résultats : on obtient donc pour chaque bâtiment du périmètre d'étude, des valeurs correspondant aux pourcentages de probabilité de l'âge du bâtiment. Ces valeurs prennent en compte le rendement des installations de chauffage et il suffira donc de multiplier ces valeurs par les besoins moyens en chauffage d'un bâtiment suivant les sept périodes de construction des bâtis, pour obtenir au final la consommation du bâtiment. Ce sont des consommations approximées à l'échelle de l'IRIS, c'est à dire que tous les bâtiments d'un même IRIS possèdent les mêmes valeurs, mais le découpage en IRIS a été réalisé en fonction du type d'habitat et donc l'erreur s'avère minime.

Cette couche aura pour nom LB4 (Listing Bâti 4).

Étape 7 :

Opération : Récupération des résultats du logiciel de calcul matriciel.

Outil : La base de données LB4 que l'on a créée avec le logiciel SIG est récupérée pour la partie calcul des besoins. Il y a tout d'abord une sélection qui est faite pour ne pas prendre en compte les bâtiments dont la hauteur est inférieure à 2m et dont la surface est inférieure à 20m². Le calcul des besoins par bâtiment est alors lancé et on le récupère en sortie dans le logiciel de SIG (outil jointure).

Résultats : On obtient alors une table composée de 55 778 bâtiments pour la ville de Tours et avec deux colonnes supplémentaires : les besoins en Wh et en KWh/m² de chaque bâtiment. Cette couche aura pour nom LB5 (Listing Bâti 5).

c) Architecture de la fabrication de la typologie du bâti

La partie suivante va consister à montrer la chronologie de la fabrication de la typologie du bâti. Cela permet de montrer les relations entre les différentes sources de données et les différentes couches créées pour obtenir la base de données finale.

Cette architecture finale permet ainsi de répondre à la question de la demande en énergie pour les besoins en chauffage. L'étape 6 avec les caractéristiques des 55 778 bâtis correspond aux données en entrée pour mesurer les besoins. L'étape 7 correspond à la création de la table de données sous SIG permettant de calculer les réseaux de chaleur.

Le schéma suivant montre l'architecture de la fabrication de la typologie du bâti :

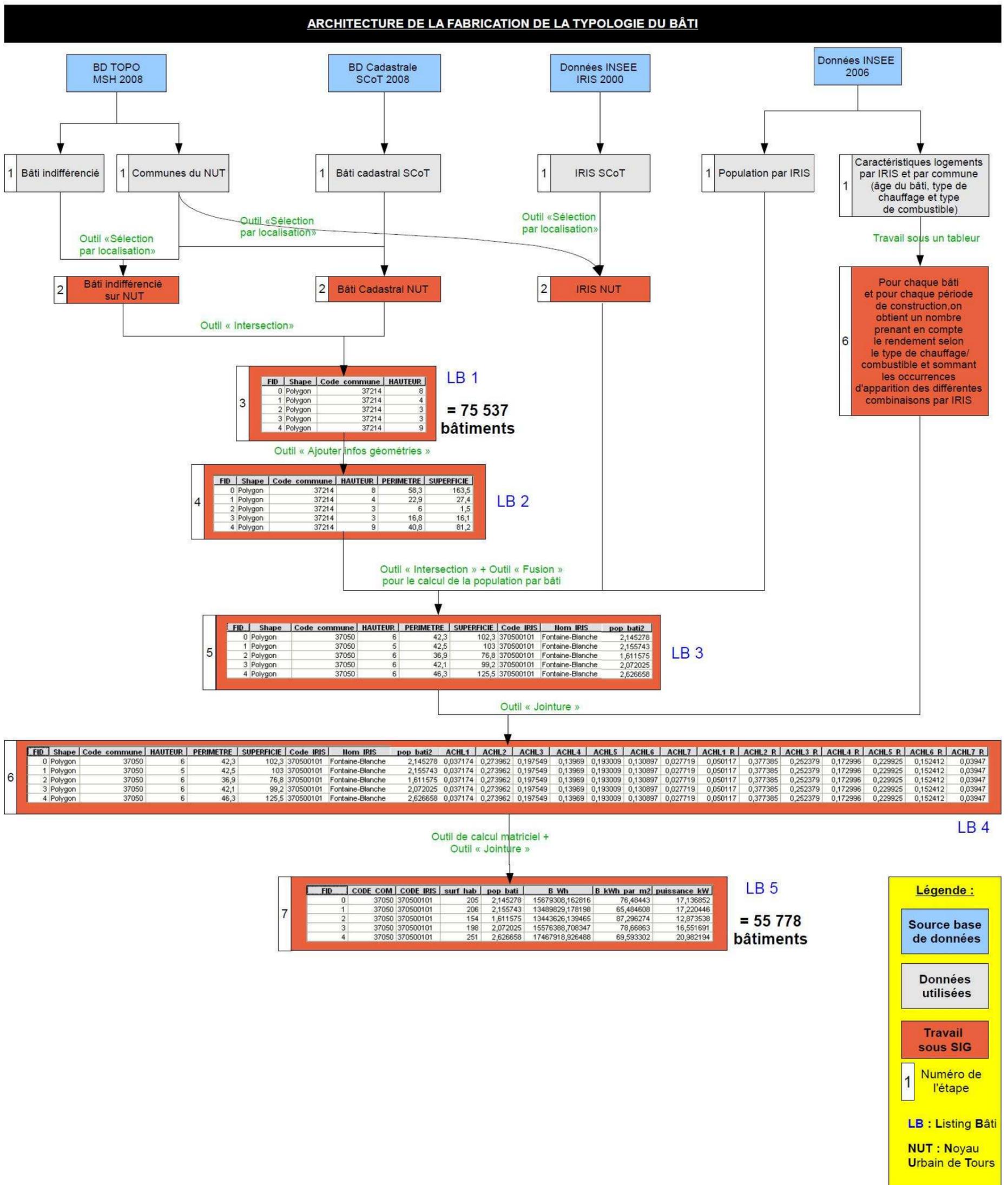


Figure 27: Schamé de l'architecture de la fabrication de la typologie du bâti

2.3 Base de données répondant à la question de l'offre en énergie

Cela correspond à la création d'une typologie pour les parcelles. Cette typologie a pour but d'obtenir des tables de données avec pour chaque parcelle de l'unité urbaine choisie, toutes les caractéristiques qui lui sont attachées.

a) Quelles données/contraintes souhaite-t-on?

On souhaite donc obtenir pour chaque parcelle :

- sa surface : il existe une taille minimum pour implanter une unité de production d'énergie.
- son zonage PLU : une unité de production d'énergie peut s'implanter sur des terrains AU ou U.
- son inondabilité : une unité de production d'énergie ne peut pas s'implanter sur des terrains inondables.
- la proximité à un bâti : il y a une distance minimum à respecter par rapport au bâti pour implanter une unité de production d'énergie.
- la présence d'une route à moins de 10m : il faut une route à proximité pour permettre l'acheminement des matières premières (bois, déchets).
- la plus grande distance qu'elle peut contenir : pour voir, indépendamment de la forme de la parcelle, quelle est la plus grande longueur qu'il peut y avoir dans une parcelle.
- son étroitesse : cela permet de ne pas sélectionner des parcelles trop étroites.

Le tableau suivant compile ces différentes informations :

Définition variable	Nom variable	Type	Source	Quelle utilité?	Hypothèses
Numéro parcelle	FID	Id	BD TOPO MSH 2008 BD Cadastrale 2008	Méthanisation/eaux usées, Chaufferies bois	On ne considère que les parcelles cadastrales non bâties, sans routes importantes les traversant et après remembrement (fusion des parcelles contiguës de moins de 15 000m ²)
Surface des parcelles	SUPERFICIE	Numérique	BD TOPO MSH 2008	Méthanisation/eaux usées, Chaufferies bois	Pas d'hypothèses particulières
Périmètre des parcelles	PERIMETRE	Numérique	BD TOPO MSH 2008	Méthanisation/eaux usées, Chaufferies bois	Pas d'hypothèses particulières
Zonage PLU des parcelles	ZONE_PLU	Texte	GéoPLU Tours+	Méthanisation/eaux usées	On utilise le zonage PLU du SCoT provenant du regroupement des différents PLU des communes du NUT
Inondabilité des parcelles	ALEA_PPRi	Texte	PPR SCoT	Méthanisation/eaux usées	On considère les aléas des PPRi du Val de Loire (2001) et du Val du Cher (2009)
Proximité du bâti	DIST_BATI	Numérique	BD TOPO MSH 2008 BD Cadastrale 2008	Méthanisation/eaux usées, Chaufferies bois	On considère que les chaufferies sont construites au centre des parcelles.
Présence d'une route à moins de 10m	DIST_ROUTE_<_10M	Booléen (1 si OUI, 0 si NON)	BD TOPO MSH 2008 BD Cadastrale 2008	Méthanisation/eaux usées, Chaufferies bois	On cherche à avoir une route la plus près possible de la parcelle pour limiter les transports.
Plus grande distance dans la parcelle	PLUS_GRANDE_DISTANCE	Numérique	BD TOPO MSH 2008 BD Cadastrale 2008	Méthanisation/eaux usées	Pas d'hypothèses particulières
Centroïde du bâti dans la parcelle	CENT_IN_PARC	Booléen (1 si OUI, 0 si NON)	BD TOPO MSH 2008	Chaufferies bois	Les parcelles ayant leurs centroïdes à l'extérieur de la parcelle ont une forme ne permettant pas d'y implanter des chaufferies.
Étroitesse de la parcelle	ETROIT_PARC	Numérique	BD TOPO MSH 2008 BD Cadastrale 2008	Chaufferies bois	On considère que l'étroitesse de la parcelle correspond au rapport du périmètre sur la plus grande longueur dans une parcelle.

Figure 28: tableau des données nécessaires pour la typologie du bâti

b) Fabrication de la typologie des parcelles par étape:

Étape 1 : Récupération des données

La BD TOPO® (RGE) 2008 : c'est une des bases de données de l'IGN contenant une description d'éléments du paysage en 3D sous forme de vecteurs de précision métrique et selon plusieurs thématiques¹. La base de données que l'on a utilisée provient de la Maison des Sciences de l'Homme (MSH) qui a apporté des modifications à la BD TOPO® (RGE) 2008 et lui a donné le nom de BD TOPO MSH 2008.

La BD Cadastre SCoT 2008 : c'est une des bases de données de la Direction Générale des Impôts (DGI). Cette base de données fait partie du Plan Cadastral Informatisé, version informatisée des planches cadastrales. . Les collectivités peuvent demander l'obtention de la BD Cadastre auprès des services départementaux des Finances Publiques. Cette base de donnée est mise à jour tous les ans.

GeoPLU Tours+ : cette base de données compile les PLU vectorisés des communes de l'Agglomération. Elle a été récupérée auprès de la Communauté d'Agglomération Tourangelle.

Plus généralement, les PLU vectorisés peuvent être récupérés auprès des mairies ou bien auprès des intercommunalités lorsqu'elles ont réalisées le travail d'assemblage des PLU de leur territoire.

PPR SCoT : Cette base de données est le Plan de Prévention des Risques sur le territoire du SCoT de l'Agglomération Tourangelle. Les PPR sont publiés par la Préfecture ou par la DDEA (Direction Départementale de l'Équipement et de l'Agriculture). Ils peuvent donc être récupérés auprès de ces organismes et également dans beaucoup de mairies impliquées par le PPR qui possèdent des exemplaires de ce document.

Base de données	Données utilisées
BD TOPO MSH 2008	Communes
	Réseau routier
	3 types de bâtis (indifférencié*/ industriel/ remarquable)
BD Cadastre SCoT 2008	Parcelles cadastrales
GeoPLU Tours+	PLU
PPR SCoT	PPRi

Figure 29: Tableau montrant les différentes données utilisées, issues des bases de données ci-dessus

*le bâti indifférencié représente environ 90% du bâti total, les bâtiments remarquables 2% et les bâtiments industriels 8%.

¹ Site de l'IGN

Étape 2 :

Opération : Sélection des données appartenant au Noyau Urbain de Tours.

Outil utilisé : « Sélection par localisation ».

Résultats : on obtient toutes les données utiles sur notre périmètre d'étude. Il existe par exemple 73 228 parcelles sur le Noyau Urbain de Tours.

Étape 3 :

Opération : Détermination des parcelles cadastrales non bâties

Outil utilisé : on utilise l'outil « Union » (ArcToolbox/Analysis Tools/Overlay/Union) sur les 3 couches des bâtis (indifférencié, industriel, remarquable) pour obtenir une seule couche avec tous les bâtis. Puis on refait une « Union » entre cette couche de bâti et les parcelles cadastrales sur le NUT.

Résultats : on obtient seulement les parcelles cadastrales sur le NUT sans bâti dessus. Il reste alors 18 540 parcelles.

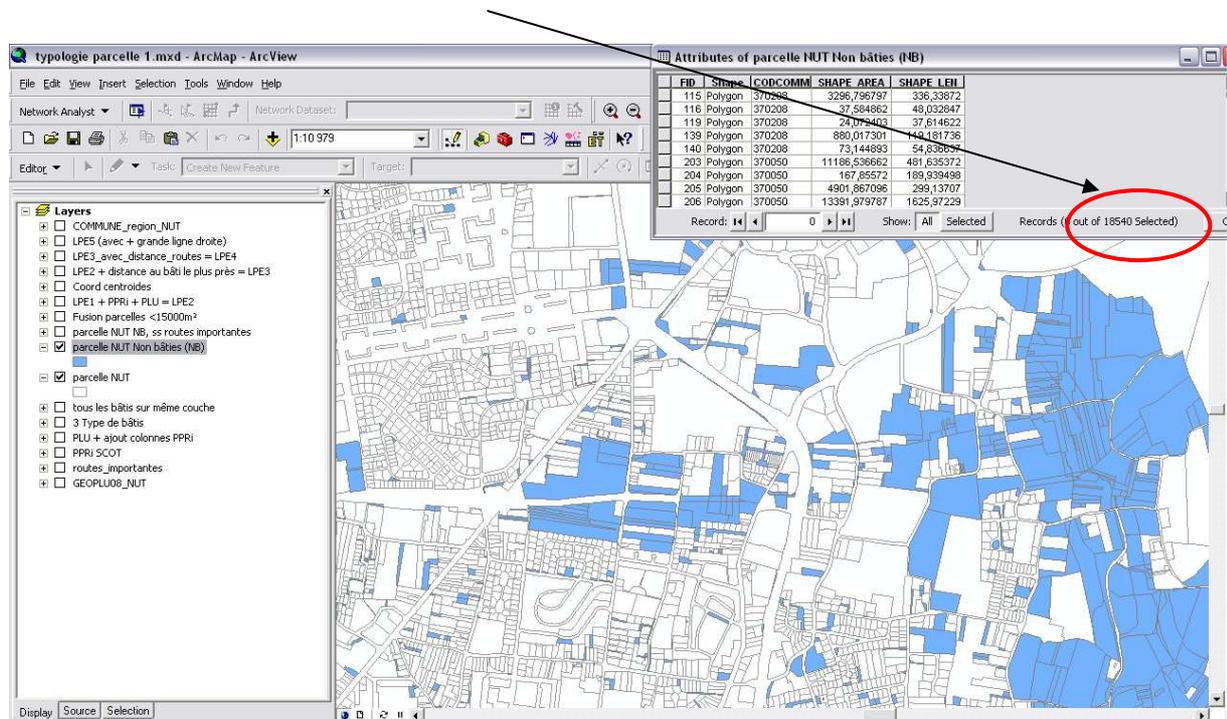


Figure 30: Exemple de la sélection des parcelles cadastrales non bâties

Étape 4 :

Opération : Détermination des parcelles cadastrales non bâties et sans routes importantes les traversant.

Outil : On réalise une « sélection par attributs » sur la couche du réseau routier par rapport à la nature de la route, pour créer une couche comportant seulement les routes importantes.

Nature du tronçon routier	Autoroute	Bretelle	Chemin	Escalier	Piste cyclable	Quasi-autoroute	Route empierrée	Route à 1 chaussée	Route à 2 chaussées	Sentier
Le tronçon est-il une route importante ?	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Non

Figure 31: Tableau sur la nature des tronçons du réseau routier

Puis, on fait une « sélection par localisation » sur la couche des parcelles de l'étape 3, pour choisir seulement les parcelles n'intersectant pas des routes importantes.

Résultat : On obtient seulement les parcelles cadastrales du NUT, sans bâti dessus et sans routes importantes les traversant. Il reste alors 16 257 parcelles potentielles.

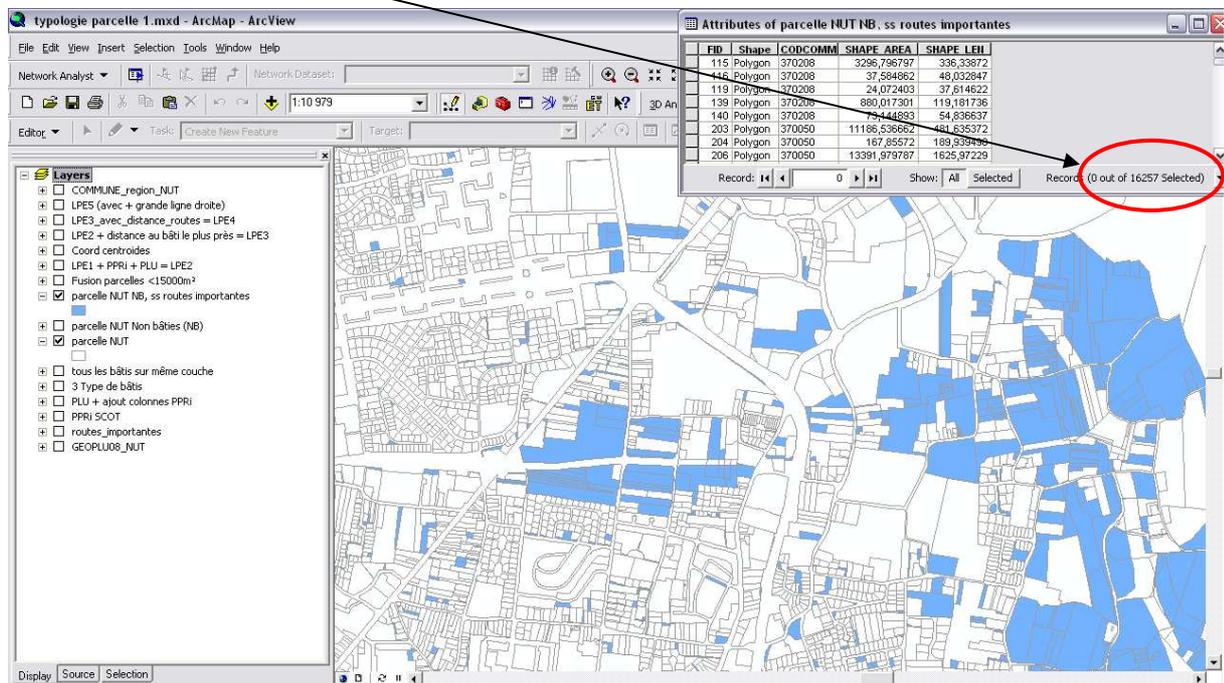


Figure 32: Exemple de la sélection des parcelles cadastrales non bâties et sans routes importantes les traversant

Etape 5 :

Opération : regroupement des parcelles contigües pour augmenter le nombre de parcelles pouvant être éligibles. Cette opération peut être assimilée à une opération de remembrement car on regroupe des parcelles ensemble. Pour réaliser cette opération, la mairie devrait acquérir ces terrains puis les fusionner. Toutes ces fusions de terrains sont hypothétiques, mais il faudra tenir compte de ces acquisitions et de ces fusions pour les parcelles où l'on choisira d'implanter des chaufferies.

Outil : On réalise tout d'abord une « sélection par attribut » sur la couche précédente pour créer une couche avec les parcelles de moins de 15 000m² et celles de plus de 15 000m².

On travaille ensuite sur la couche des parcelles de moins de 15 000m². On utilise tout d'abord l'outil « Dissolve (fusion)» (ArcToolbox/Data Management Tools/Generalization/Dissolve) pour créer un polygone contenant tous les parcelles. Il

faut ensuite utiliser un outil de *ET GeoWizards 9.9¹*, nommé « Explode multi-part features » permettant d'obtenir une couche avec les parcelles fusionnées.

Résultat : On obtient seulement les parcelles cadastrales du Noyau Urbain de Tours, sans bâti dessus, sans routes importantes les traversant et après avoir fait une fusion des parcelles contigües de moins de 15 000 m². Il reste alors 5 970 parcelles potentielles : ce sont ces parcelles sur lesquelles nous travaillerons par la suite. Le numéro d'identifiant de la parcelle à ce stade sera celui que l'on gardera pendant le reste de l'étude.

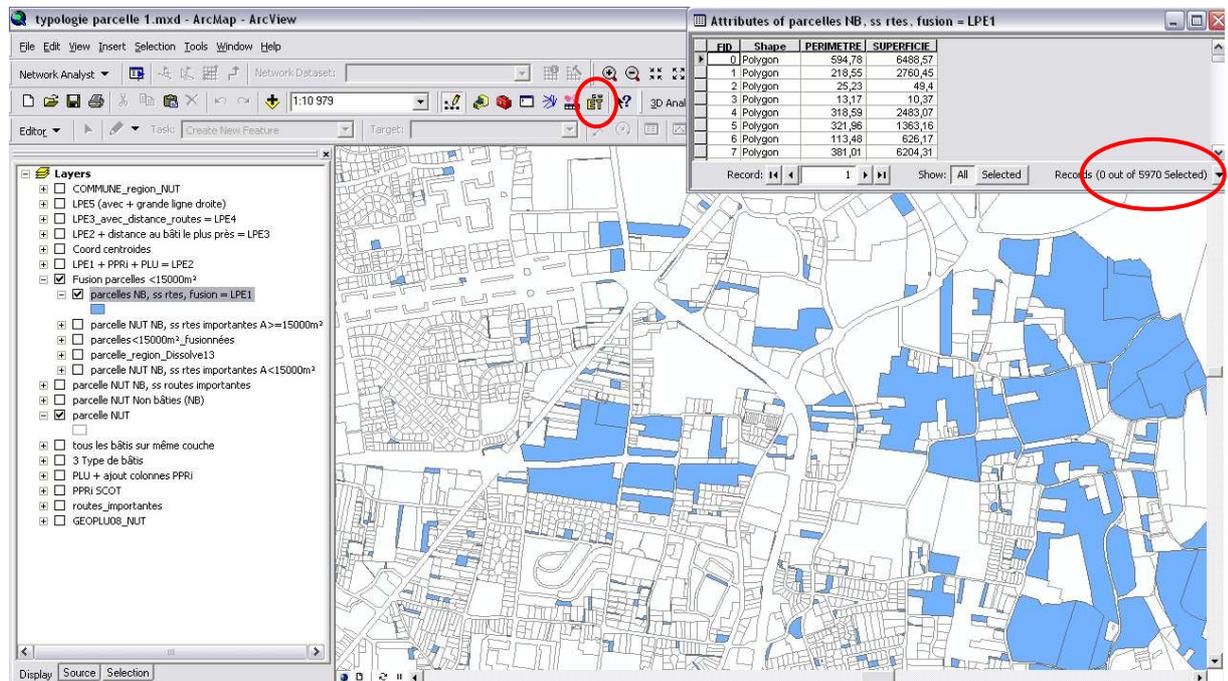


Figure 33: Exemple de la sélection des parcelles cadastrales non bâties, sans routes importantes les traversant et après remembrement

Étape 6 :

Opération : détermination des caractéristiques géométriques des parcelles.

Outil : utilisation de l'outil « Ajouter infos géométries ».

Résultat : On obtient alors le périmètre et la superficie des 5 970 parcelles potentielles. Cette couche aura pour nom LP1 (Listing Parcelle 1).

Étape 7 :

Opération : ajout des informations sur le zonage PLU et sur celui des aléas du PPRi sur le périmètre du NUT.

Outil : on réalise tout d'abord une « intersection » entre le PLU et le PPRi pour avoir pour chaque zone du PLU des informations sur le PPRi. Puis on réalise une jointure spatiale (ArcToolbox/Analysis Tools/Overlay/Spatial Join) entre la couche précédente et LP1.

¹Outil n'existant pas dans la version ArcGIS 9.2 et à télécharger sur le site internet <http://www.ian-ko.com/>

Zone PLU	UA	UB	UC-UD	UP-NH	UE	UX	UZ	1AU	AU	A	N
Intitulé	Zone centrale, centre ville, centre bourg	Zone urbaine relativement dense	Zone urbaine moins dense	Zone de bâti dispersé, hameau	Zone d'équipement	Zone d'activités	ZAC (en cours ou achevée)	Zone d'urbanisation future (court et moyen terme)	Zone d'urbanisation future (long terme)	Zone agricole	Zone naturelle

Figure 34: Tableau de la signification des différents zonages PLU

Résultat : On obtient alors, pour chacune des 5 970 parcelles, dans quel zonage PLU elle se trouve, si elle est en zone inondable et si oui dans quel aléa. Deux colonnes sont ainsi rajoutées : une avec le zonage PLU et une avec l'aléa PPRI.

Cette couche aura pour nom LP2 (Listing Parcelle 2).

Étape 8 :

Opération : détermination de la proximité d'une route importante aux abords d'une parcelle. Cela permet d'éviter de sélectionner des parcelles isolées sans accès direct pour acheminer les matières premières et engendrant par conséquent des coûts importants pour la construction de routes.

Outil : Pour cela, on réalise une simple « Sélection par localisation » sur LP2 pour avoir les parcelles dont la frontière extérieure se trouve à moins de 10 mètres d'une route importante.

Résultat : On obtient les parcelles avec une nouvelle colonne de type booléenne avec 1 s'il existe une route importante à moins de 10m du bord de la parcelle et 0 sinon. Cette couche aura pour nom LP3 (Listing Parcelle 3).

Étape 9 :

Opération : Détermination de la distance de la parcelle par rapport au bâti. On considère que le digesteur se trouve au centre de la parcelle, donc on va calculer la distance du centroïde de la parcelle au plus proche bâti.

Détermination si le centroïde de la parcelle se trouve à l'intérieur de la parcelle.

Outil : Il faut d'abord créer une couche avec les centroïdes des parcelles de LP3. Pour cela, on crée dans LP3 les colonnes centroïdeX et centroïdeY (Open attribute table/Add Field/ Calculate Geometry), puis on ajoute les coordonnées X,Y à cette couche de points générée (Tools/Add X,Y Data).

On utilise ensuite un outil de *ET GeoWizards 9.9* : « Point Distance » qui permet de mesurer la distance entre un point et un polygone. Cela permet de mesurer la distance entre les centroïdes des parcelles de LP3 et la couche de polygones des bâtis indifférenciés.

Pour déterminer si le centroïde de la parcelle se trouve dans la parcelle elle-même, on réalise une « sélection par localisation » sur les centroïdes des parcelles de LP3.

Résultat : On obtient une nouvelle colonne avec la distance entre la chaufferie et

l'habitation la plus proche. Mais cette mesure part du centre de la chaufferie, il faut donc prendre en compte la taille du digesteur car la distance limite est entre la façade du digesteur et la façade de l'habitation la plus proche.

On obtient par ailleurs une colonne de type booléenne avec 1 si le centroïde de la parcelle se situe dans la parcelle et 0 sinon.

Cette couche aura pour nom LP4 (Listing Parcelle 4).

Étape 10 :

Opération : Détermination de la plus grande distance comprise dans une parcelle. Détermination de l'étroitesse des parcelles

Outil : On utilise un outil à charger dans ArcToolbox nommé « Bounding Containers »¹. Cela permet de créer une couche calculant la plus grande longueur incluse dans la parcelle. On réalise alors une jointure de cette couche avec la couche LP4.

Pour déterminer l'étroitesse de la parcelle, on rajoute une colonne à la table attributaire de LP4. Cette colonne correspond à la division du périmètre par la plus grande distance incluse dans la parcelle. L'étroitesse de la parcelle est définie dans la partie sur les contraintes sur le chauffage bois.

Résultat : On obtient donc deux colonnes supplémentaires dont l'une correspond à la longueur de la plus grande distance incluse dans la parcelle, et l'autre à l'étroitesse de la parcelle. Cette couche aura pour nom LP5 (Listing Parcelle 5).

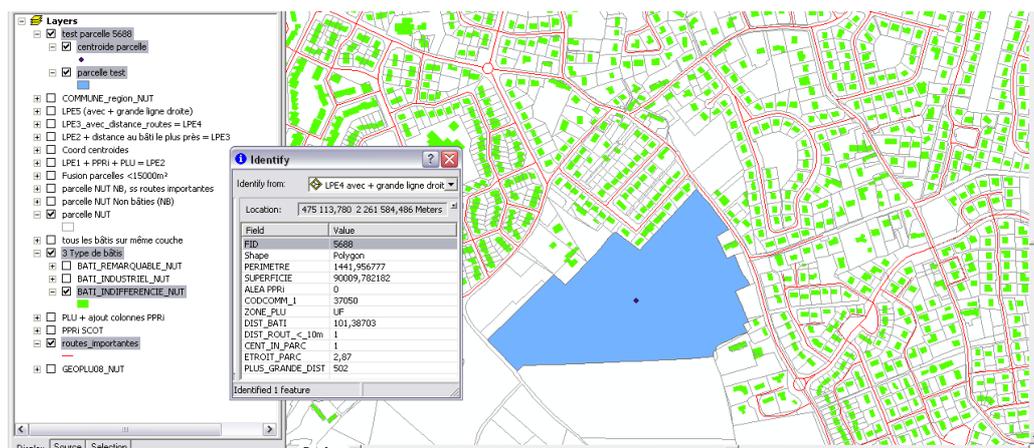


Figure 35: Exemple de toutes les informations que l'on obtient pour la parcelle 5688 du Noyau urbain de Tours

c) Architecture de la fabrication de la typologie des parcelles

La partie suivante va consister à montrer la chronologie de la fabrication de la typologie des parcelles. Cela permet de montrer les relations entre les différentes sources de données et les différentes couches créées pour obtenir la base de données finale.

Le schéma suivant montre l'architecture de la fabrication de la typologie des parcelles.

¹ A télécharger sur le site d'ESRI à l'adresse suivante : <http://arcscripits.esri.com/details.asp?dbid=14535>

ARCHITECTURE DE LA FABRICATION DE LA TYPOLOGIE DES PARCELLES

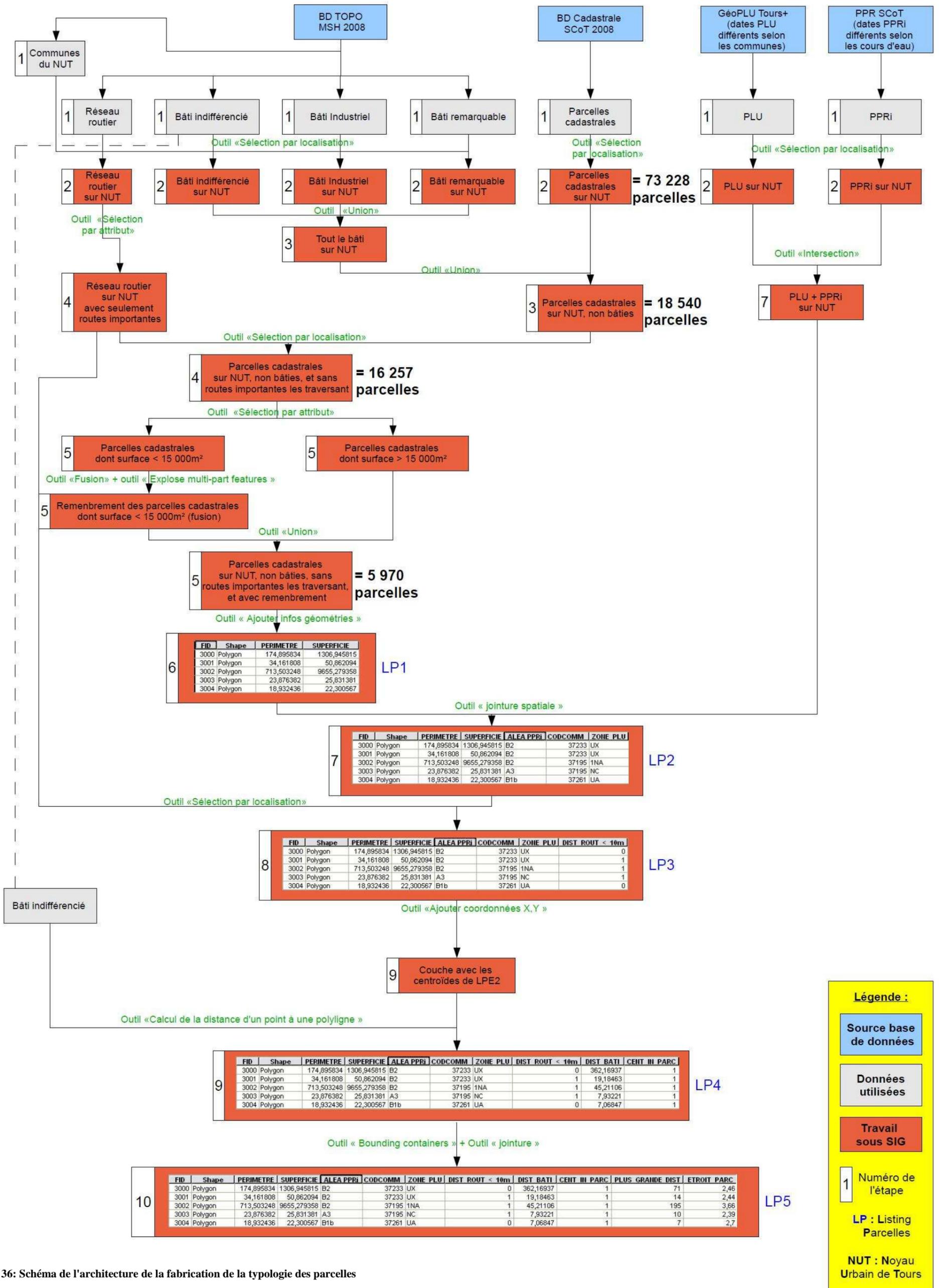


Figure 36: Schéma de l'architecture de la fabrication de la typologie des parcelles

2.4 Vers une automatisation de la production cartographique ?

Les logiciels de SIG permettent d'automatiser certaines fonctions lors de la création des couches. Sous ArcGIS 9.2 par exemple, il existe ce qu'on appelle les « Géotraitements »¹ qui permettent de mettre en place rapidement, simplement et sans développement des processus de traitement cartographique.

Mais dans notre cas, il n'y a pas seulement des étapes avec des manipulations d'un simple outil : il y a tout un travail de mise en forme des tables de données, de sélection de données, de calcul de données dans la table attributaire ou d'utilisation d'outils rajoutés au logiciel. Or ce travail ne peut pas se faire avec les Géotraitements. Au final on aurait donc plusieurs petites unités de Géotraitements, ce qui s'avérerait peut-être même plus compliqué que de faire les étapes sans automatisation.

En conclusion, le logiciel SIG permet de réaliser l'automatisation de certaines manipulations cartographiques, mais dans le cas de notre étude cette automatisation ne serait pas pertinente.

2.5 Conclusion

Grâce au SIG, il est donc possible de répondre presque entièrement aux contraintes et aux conditions répondant aux questions de l'offre et de la demande. La représentation cartographique est quant à elle une des fonctions de base d'un logiciel de SIG. La modélisation du problème avec l'aide d'un SIG est donc une solution très pertinente.

On peut donc conclure sur le fait que l'utilisation d'un SIG en tant que complémentaire d'un outil de calcul matriciel est parfaitement adaptée dans une problématique de création de réseaux de chaleur à l'échelle d'une unité urbaine.

¹Une démonstration des « Géotraitements » est disponible sur le site d'ESRI à l'adresse suivante : http://www.esrifrance.fr/iso_album/geotraitements_1.swf

3. Le réseau de distribution et de collecte des déchets

Comme nous l'avons vu précédemment le réseau est un ensemble de nœuds reliés par des arcs. Cette étape consiste dans un premier temps à détailler :

- La méthode établie pour attribuer une distance aux arcs du réseau
- La méthode et les outils utilisés pour la simplification du réseau et l'accrochage du bâti au réseau.

Au cours de cette partie, nous expliquerons comment construire une matrice des chemins minimaux à partir d'un SIG.

3.1 Création de la matrice des chemins minimaux

Le schéma ci-dessous représente l'ordonnancement des étapes à réaliser pour construire la matrice des chemins minimaux.

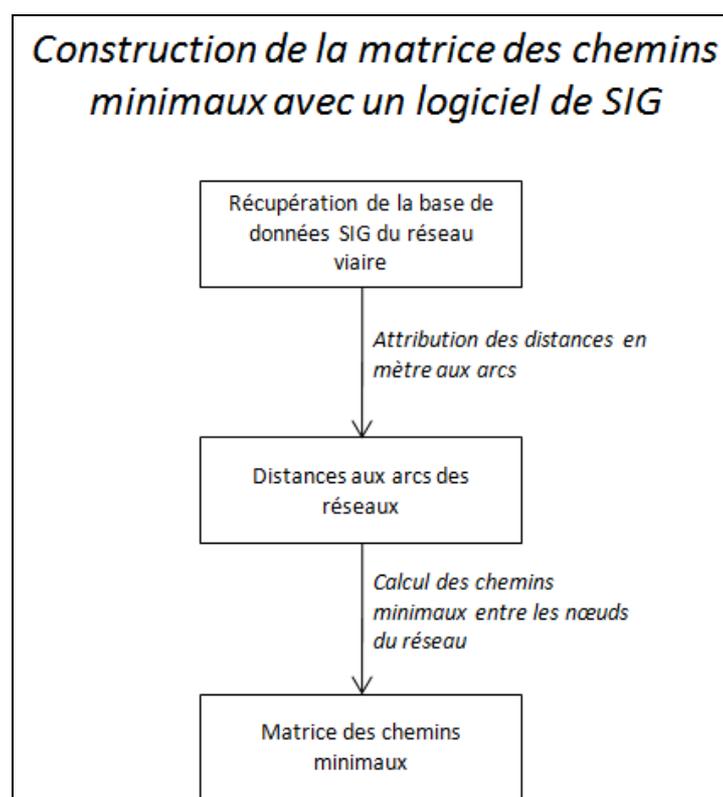


Figure 37: Construction de la matrice des chemins minimaux avec un logiciel de SIG

Pour construire la matrice des chemins minimaux, dans le cas de cette étude, nous utiliserons le module *Network Analyst* du logiciel *ArcGis*. Lors du paramétrage du moteur de calcul, il est important de bien vérifier que les arcs seront valués en mètres et ne seront pas orientés. Il est important de réaliser cette étape correctement car le réseau

de distribution ou de collecte des déchets et eaux usées en dépendra.

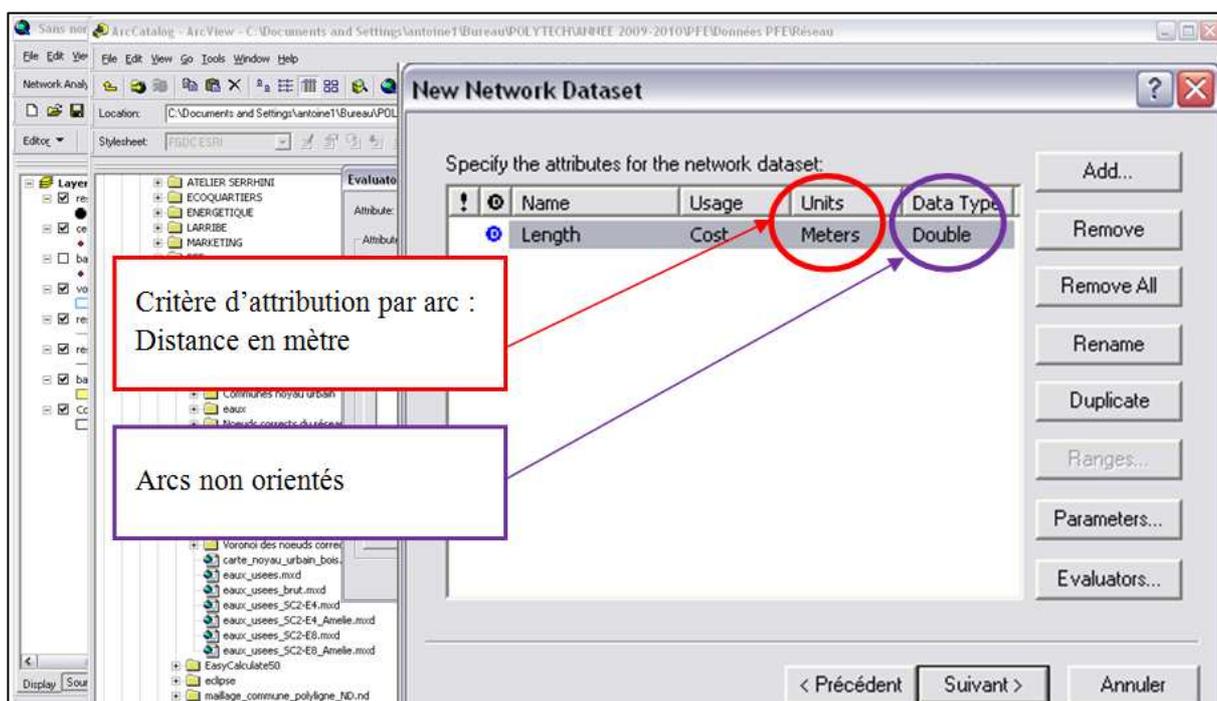


Figure 38: Paramétrage du logiciel pour la construction du réseau: unité et sens des arcs

Une fois le paramétrage correctement fait, le logiciel crée une couche avec les longueurs des arcs du réseau et localise les nœuds. On peut alors procéder au calcul de la matrice des chemins minimaux.

Toujours dans *Network Analyst*, on sélectionne « coût de matrice OD ». A ce moment, il s'agit de définir les nœuds origines et les nœuds destinations. De manière à alléger le calcul matriciel, on n'effectuera pas un calcul de tous les nœuds vers tous les nœuds mais seulement de l'unité source de chaleur ou de récupération vers tous les nœuds. Ainsi dans un cas où l'on aurait 10 000 nœuds, la matrice ne serait pas de $10\,000 \times 10\,000$ mais de $1 \times 10\,000$. Cette opération sera répétée pour chacune des unités installées sur le territoire d'étude.

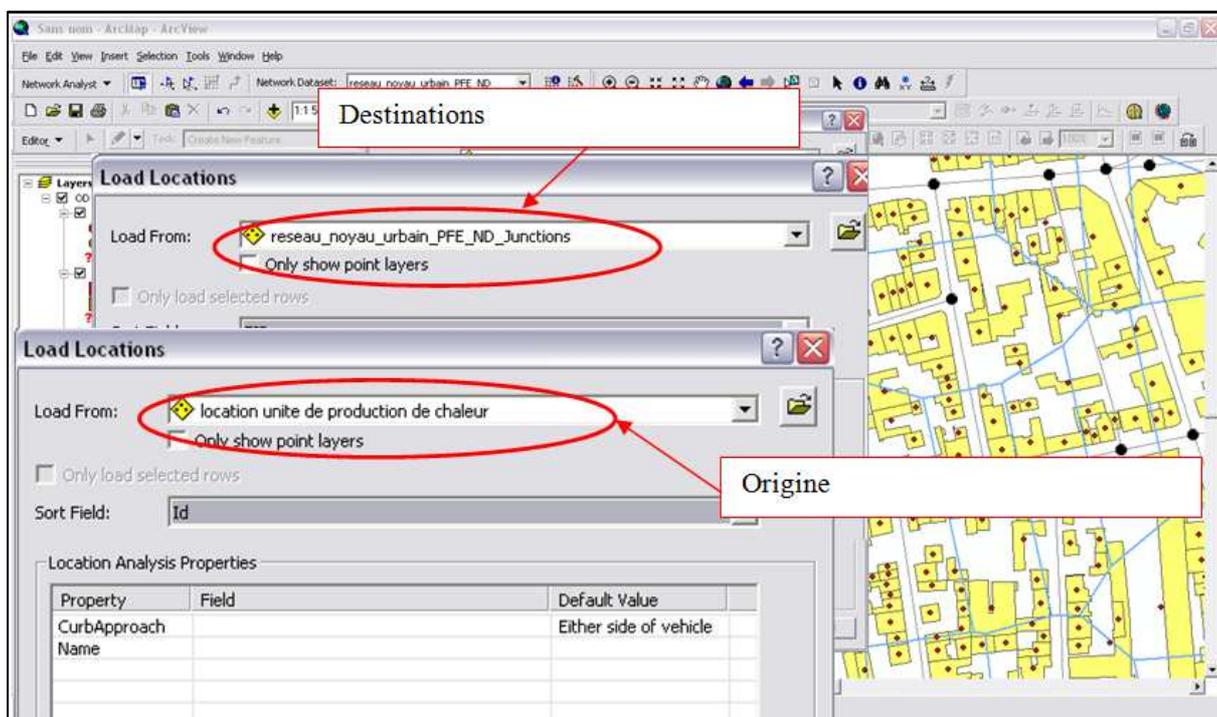


Figure 39: Exemple de sélection d'origine et de destination pour la construction de la matrice des chemins minimaux

3.2 Méthode de simplification pour la distribution de chaleur et la collecte des déchets et des eaux usées.

Il s'agit ici de développer une méthode appliquée, pouvant s'adapter à n'importe quel territoire et simplifier la distribution de la chaleur et la collecte des déchets et des eaux usées. En effet, en fonction de l'échelle traitée, le nombre de bâtiments présents sur le territoire peut devenir très important, voire même ingérable pour les calculs matriciels qui seront à réaliser.

Il est nécessaire de créer des zones de distribution justifiables d'un point de vue urbain. Comme nous l'avons vu précédemment, le diagramme de Voronoï permet une segmentation de l'espace en fonction de la densité du réseau viaire. Le module Geostatistical Analyst dans le logiciel ArcGis permet la construction de cellules de Voronoï dont les centres sont les nœuds routiers.

Le diagramme du Voronoï

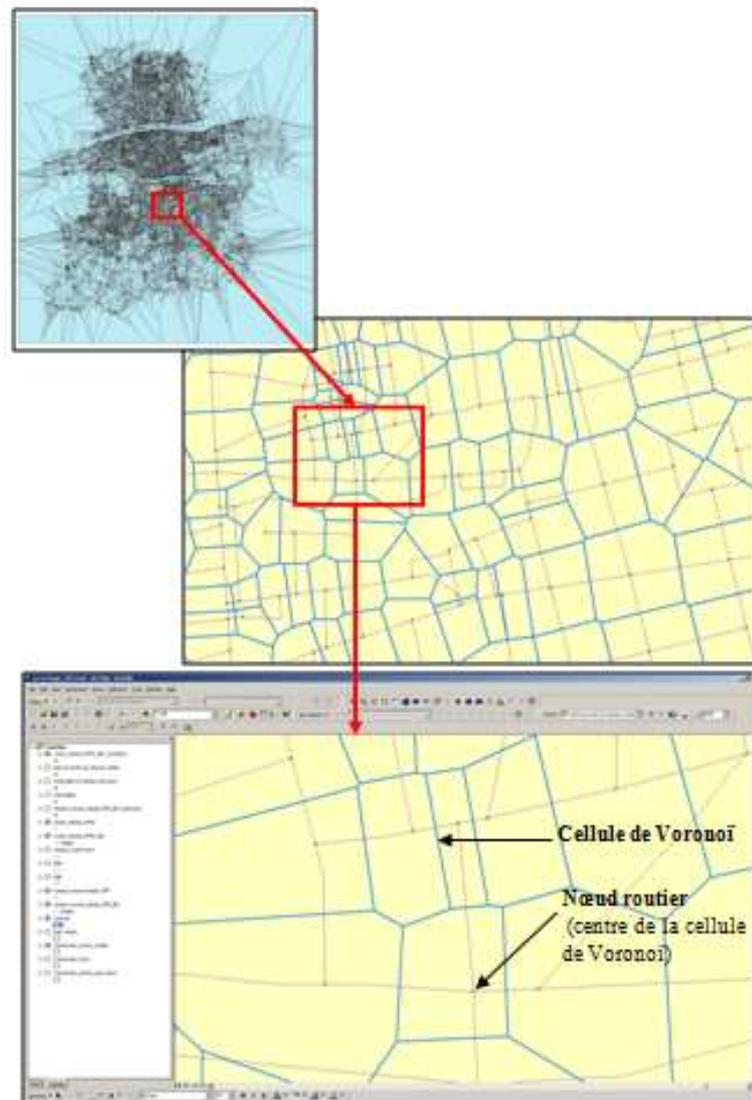


Figure 40: Illustration du diagramme de Voronoï

Une fois le diagramme de Voronoï appliqué sur le territoire, on le superpose à la couche du bâti construite au préalable. Cette étape est réalisée grâce à l'outil « *centroïdes* » téléchargeable sur le site ESRI France. Ce dernier permet d'attribuer un centroïde à chaque polygone de la couche. On note que chaque centroïde enregistre les données propres à son bâtiment.

Attribution des centroïdes au bâti

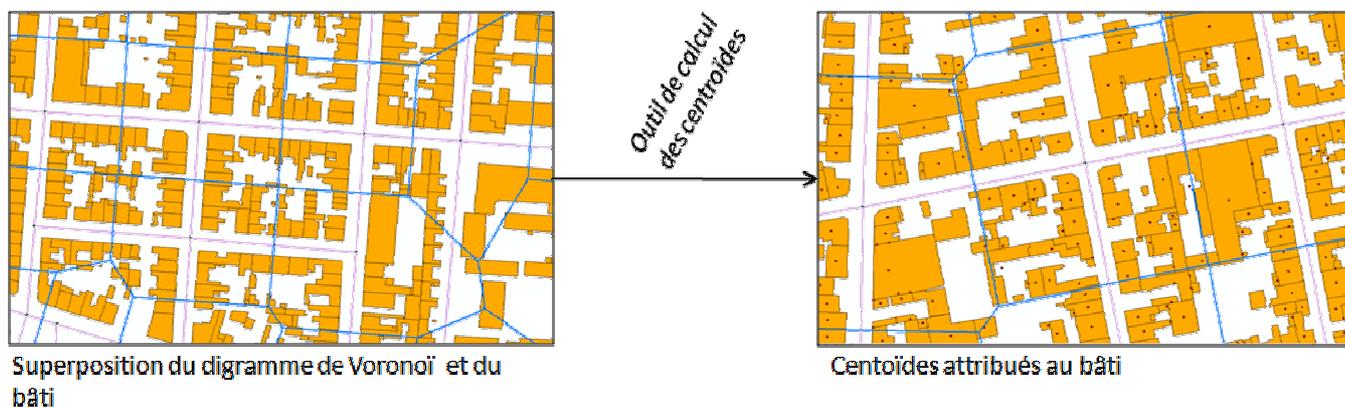


Figure 41: Illustration de l'attribution des centroïdes au bâti

Pour la projection des centroïdes sur le réseau, on utilise l'outil « *accrochage* », également téléchargeable sur le site internet d'ESRI France. A ce moment, toutes les caractéristiques des centroïdes des bâtiments raccrochés au réseau (quantité de déchets produite, besoins énergétiques, eaux usées produites, habitants, ...), présents dans une même cellule de Voronoï, sont sommées puis attribuées au nœud routier correspondant.

Accrochage des centroïdes au réseau

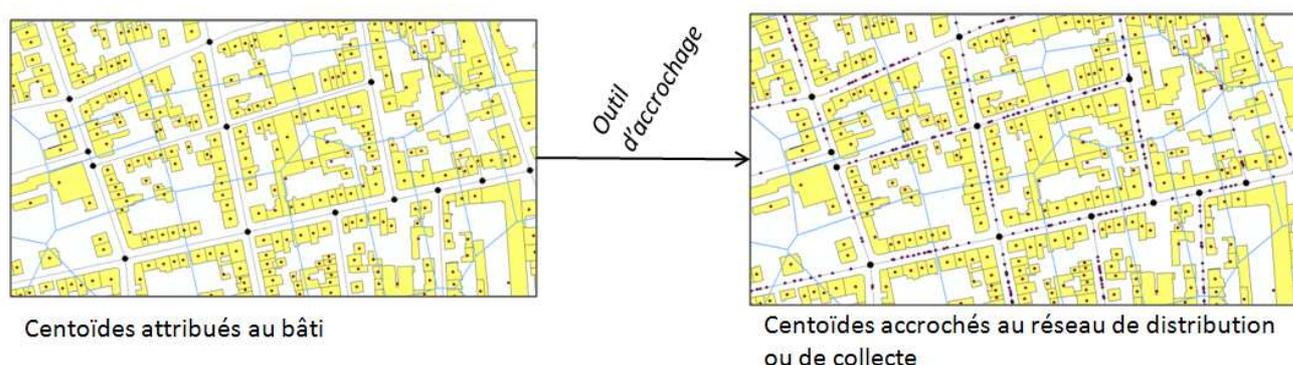


Figure 42: Illustration de l'accrochage des centroïdes au réseau

4. Le modèle de reconstitution de la demande

La méthode pour calculer les besoins énergétiques des logements expliquée précédemment va être mise œuvre sous la forme d'un programme informatique développé à l'aide d'un logiciel de calcul matriciel. Le schéma suivant illustre la procédure dans son ensemble.

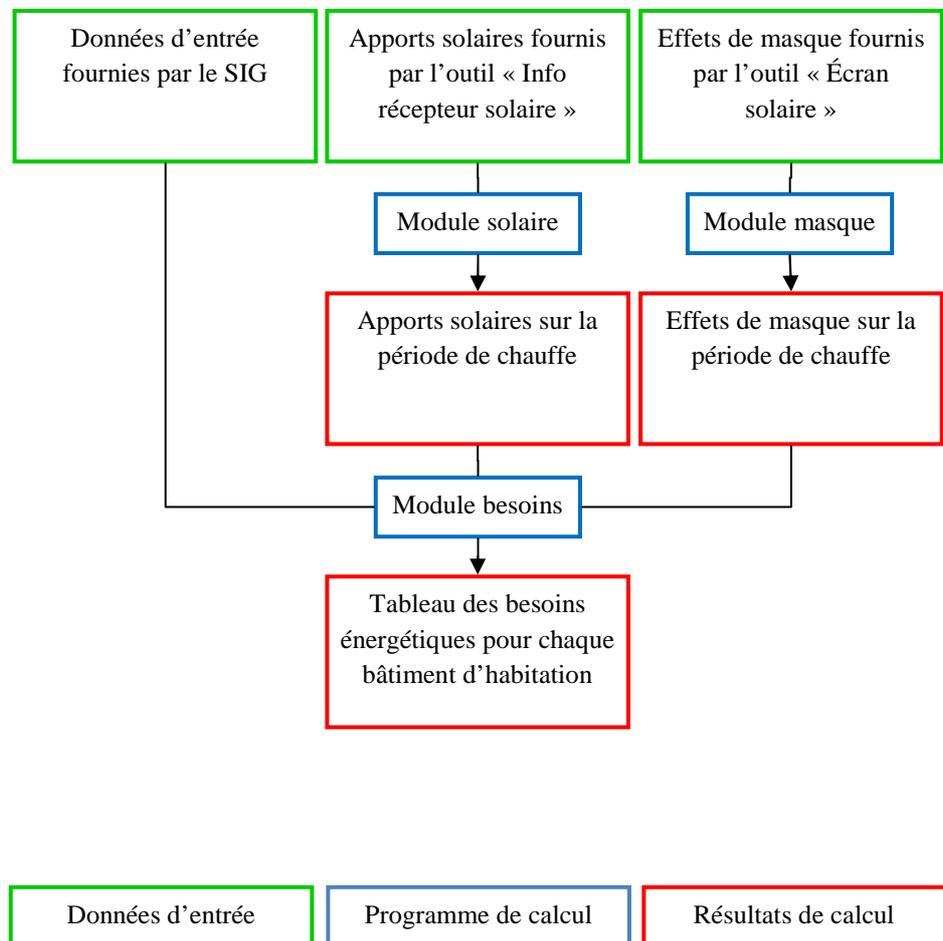


Figure 43 : Schéma opérationnel du calcul des besoins

On retrouve trois catégories de données en entrée. Les premières sont les informations récupérées d'une base de données cartographique. Elles contiennent le bâti de la zone à étudier ainsi que ses caractéristiques.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	FID_	SUPERFICIE	PERIMETRE	HAUTEUR	nb_paliers	surf_hab	pop_bati2	ACHL1	ACHL2	ACHL3	ACHL4	ACHL5	ACHL6	ACHL7
2	0	102,251733	42,274413	6	2	205	2,145278	0,037174	0,273962	0,197549	0,13969	0,193009	0,130897	0,027719
3	1	102,988029	42,470457	5	2	206	2,155743	0,037174	0,273962	0,197549	0,13969	0,193009	0,130897	0,027719
4	2	76,779005	36,940764	6	2	154	1,611574	0,037174	0,273962	0,197549	0,13969	0,193009	0,130897	0,027719
5	3	99,158114	42,103798	6	2	198	2,072024	0,037174	0,273962	0,197549	0,13969	0,193009	0,130897	0,027719
6	4	125,499115	46,327486	6	2	251	2,626657	0,037174	0,273962	0,197549	0,13969	0,193009	0,130897	0,027719

Figure 44 : Extrait du tableau d'entrée des données

Ces données sont fournies sous forme de tableau. La première ligne contient les en-têtes, puis chaque ligne supplémentaire correspond à un bâtiment. On y retrouve les informations suivantes :

- FID : numéro d'identification du bâtiment
- SUPERFICIE : surface au sol du bâtiment en m²
- PERIMETRE : longueur du périmètre du bâtiment en m
- HAUTEUR : hauteur du bâtiment en m
- nb_paliers : nombre d'étages du bâtiment
- surf_hab : surface habitable du bâtiment
- Pop_bati2 : nombre de personnes vivant dans le bâtiment
- ACHL1 à ACHL7 : pourcentage attribué à chaque période de construction pour chaque bâtiment.

On a vu que les données récupérées ne donnent pas l'année exacte de construction de chaque bâtiment mais un pourcentage pour chaque période (colonnes ACHL1 à ACHL7 sur la figure ci-dessous). Chaque pourcentage est donc multiplié par la résistance thermique correspondant à la période, puis on somme les sept résultats obtenus pour avoir la résistance thermique du bâtiment, celle qui sera utilisée dans les calculs des déperditions par l'enveloppe. Ce même principe est utilisé pour le taux de vitrage et le coefficient surfacique des vitrages. On applique ensuite les formules de calcul des déperditions par l'enveloppe (parois opaques et vitrages) au travers d'une boucle qui parcourt tous les bâtiments.

Les secondes données d'entrées sont les apports solaires. C'est le module solaire qui se charge de réaliser l'interpolation à partir des valeurs des quatre jours saisies. L'image ci-dessous représente la variation des apports solaires au cours des 8760 heures que compte une année selon une direction et une location données. Le programme effectue ensuite une intégrale sur la période de chauffe considérée.

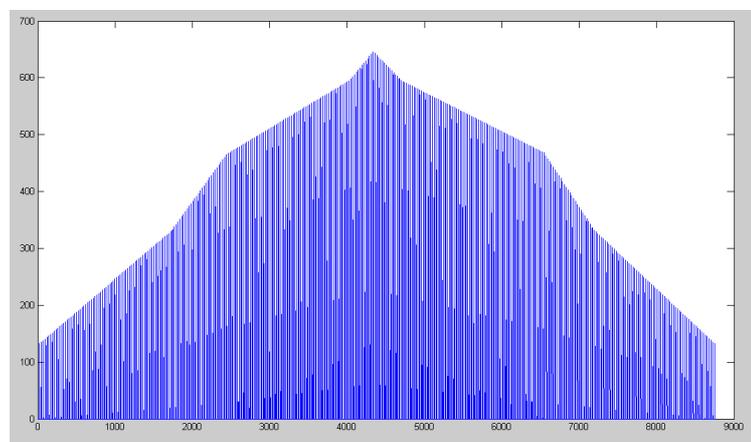


Figure 45 : Courbe des apports solaires sur une année

Pour calculer les valeurs d'effet de masque, le programme fonctionne globalement de la même manière que pour les apports solaires, mais enregistre un pourcentage de perte plutôt qu'une énergie reçue en Wh/m². On ne prend évidemment pas en compte l'effet de masque quand les apports solaires sont nuls, c'est-à-dire la nuit. En sortie, on obtient un tableau donnant pour chacune des treize orientations la réduction des apports solaires sur la période de chauffe.

Au final, le module besoin s'occupe de calculer les différents apports et déperditions selon les formules vues précédemment, ainsi que le bilan, pour ensuite écrire la matrice des résultats dans un tableau qui pourra être importé et lu dans le logiciel de cartographie.

5. Le modèle relatif à l'offre énergétique

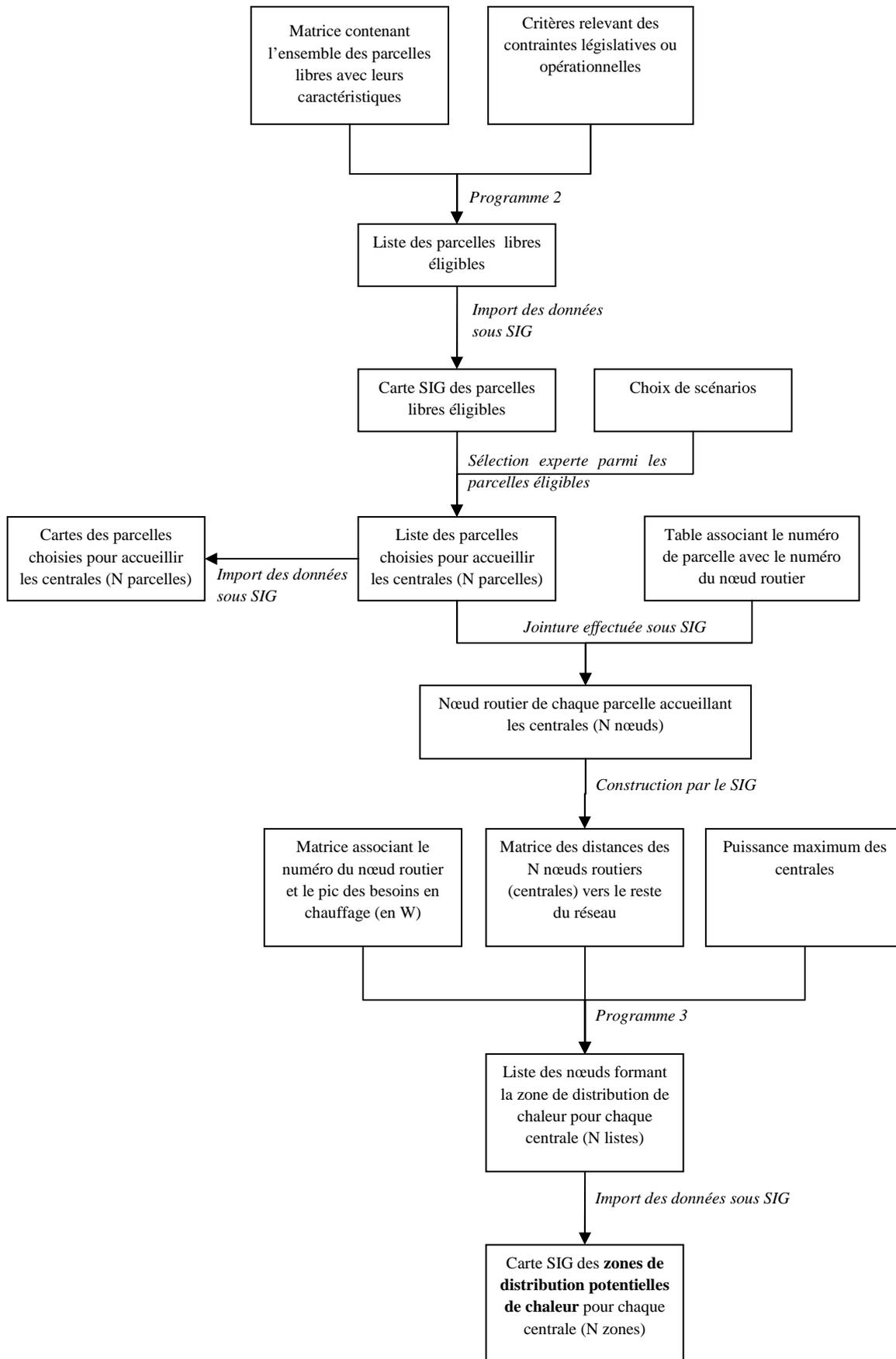
5.1 L'offre bois

a) Sélection des parcelles contenant les centrales

Les critères quantifiables peuvent être automatisés. C'est pourquoi la sélection s'effectue grâce à un programme créé par un logiciel de calcul matriciel. Ce programme considère parmi les critères préalablement cités ceux de constructibilité, zone inondable, surface (création des catégories), présence d'une route, rapport périmètre/longueur, et présence du centroïde dans la parcelle.

La finalisation de la sélection se fait à dire d'expert, grâce à la vérification par notre connaissance (ou par les photos aériennes) que la parcelle est bien inoccupée (pas de cimetière, parc,...).

Ensuite, une fois la puissance des chaudières que l'on veut installer déterminée, un programme nous permet de répartir cette puissance entre les bâtiments selon le pic de leurs besoins et ainsi obtenir des zones de distribution potentielles de la chaleur.



Programme 2 : Programme de sélection des parcelles

Programme 3: Programme de création des zones de distribution potentielles de l'énergie

Figure 46 : Schéma de la sélection des parcelles et création des zones de distribution potentielle

b) Estimation des ressources en bois nécessaires pour répondre à la demande

Ainsi, à partir de la quantité d'énergie que les chaudières doivent fournir pour répondre à la demande, un programme effectue les calculs précédemment expliqués et permet de connaître la quantité de bois nécessaire pour alimenter le réseau. Cette quantité varie selon l'humidité et le type de bois, c'est pourquoi il est nécessaire d'avoir en données d'entrée l'humidité et le type (feuillus ou résineux) voulus. Afin d'avoir une caractéristique plus parlante visuellement, nous chercherons à connaître l'équivalent de la quantité de bois en hectares de forêt: pour cela une multiplication est incorporée dans le programme. Ensuite, cette surface est représentée sur les cartes.

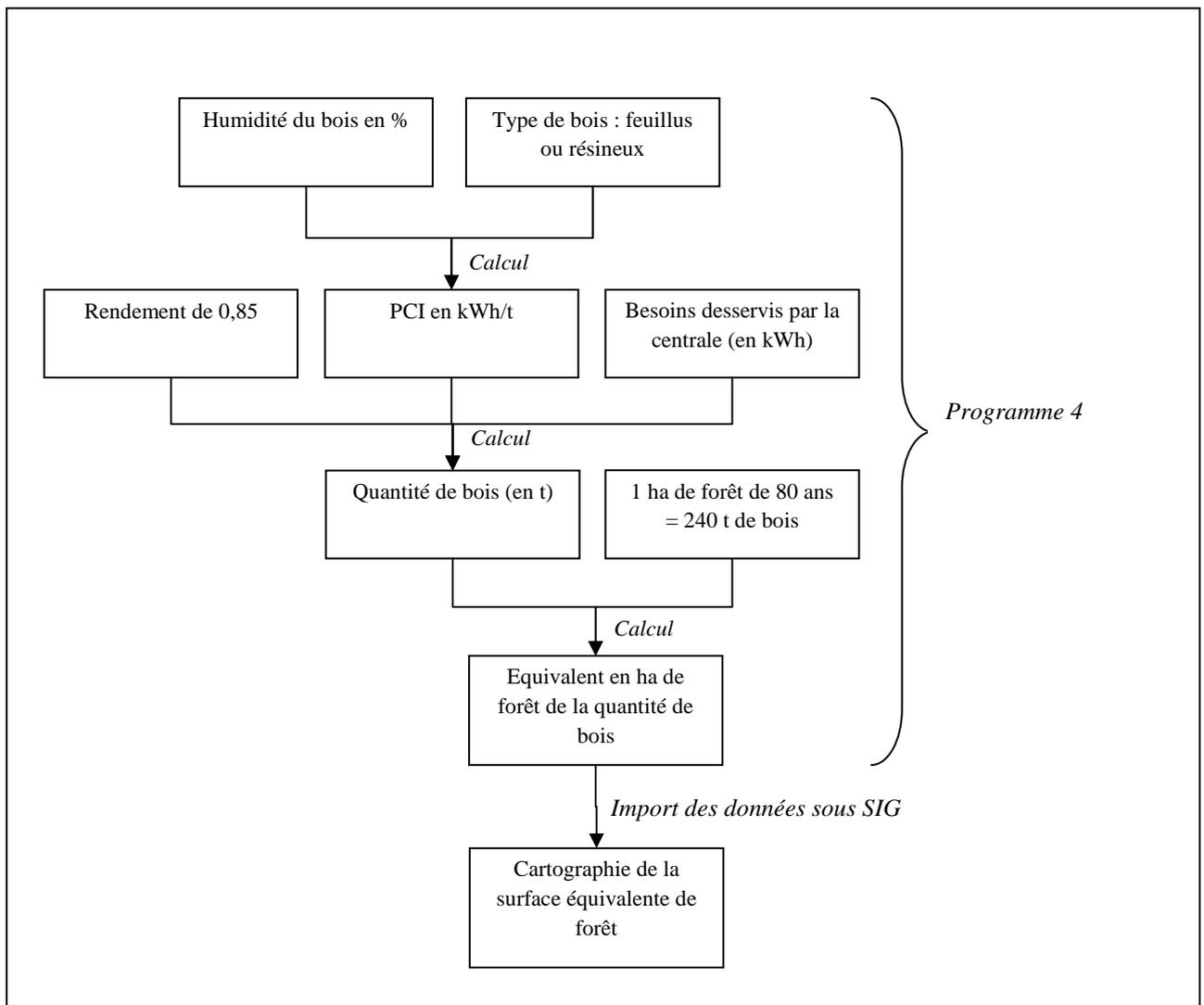


Figure 47 : Détermination de la ressource en bois nécessaire à partir de la demande en énergie

5.2 L'offre méthanisation

Nous allons détailler le processus opérationnel que nous avons choisi pour répondre à ce qui a été exposé pour l'offre méthanisation dans la partie théorique.

La figure 48 rend compte de la démarche opérationnelle concernant l'offre méthanisation. Les flèches représentent une action et les cadres des données ou des cartes. La démarche doit être répétée autant de fois qu'il y a de scénarios se différenciant par le nombre d'unités de méthanisation.

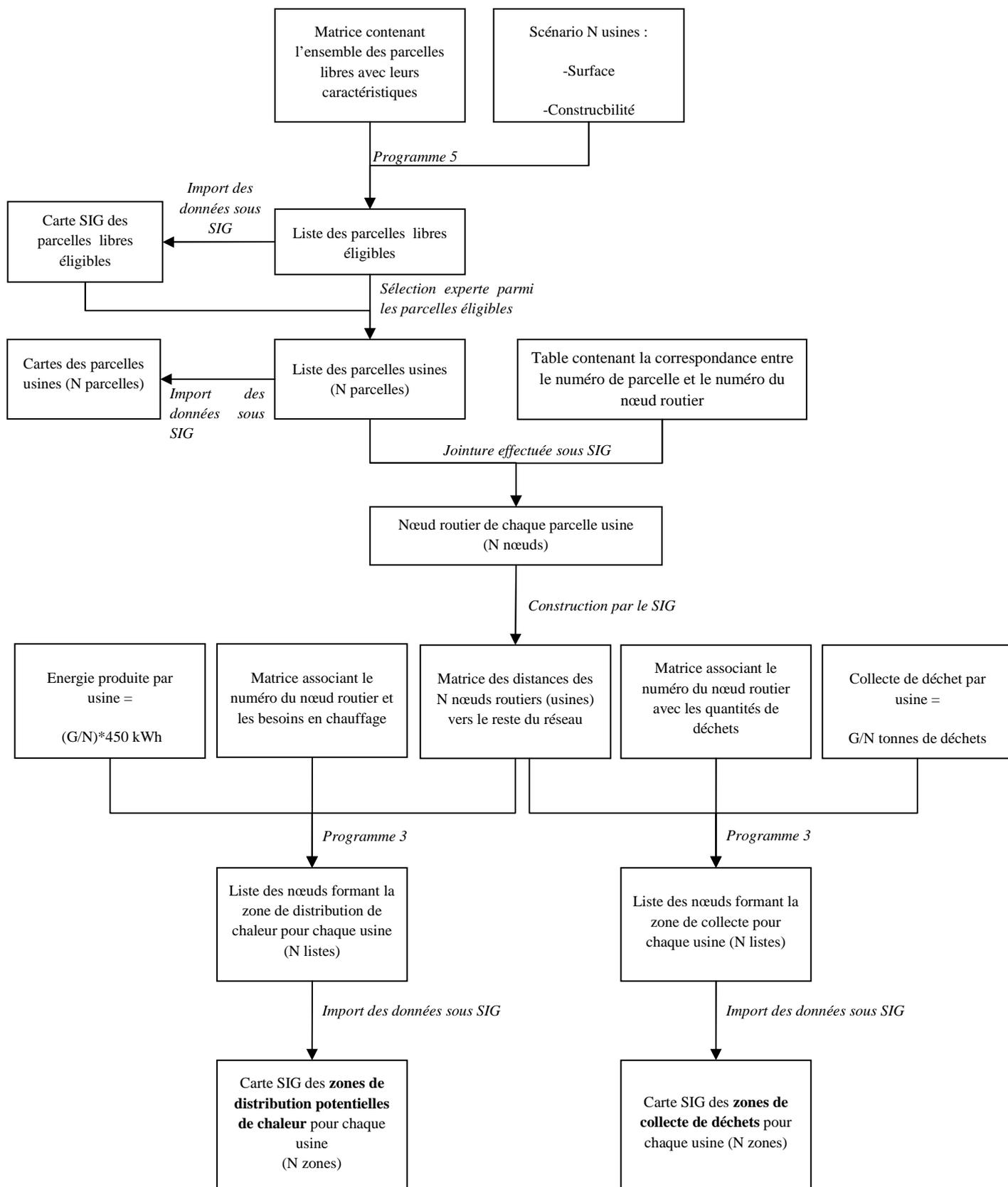
a) Les programmes utilisés

Le programme 5 a pour objectif de sélectionner les parcelles libres d'un espace urbain donné répondant aux critères énoncés dans la partie théorique. Le programme peut être paramétré afin de créer les scénarios évoqués précédemment en modifiant la surface minimale de la parcelle.

Le programme 3 a pour objectifs de créer les zones de collecte de déchets et de distribution potentielles de chaleur.

Dans le cas de la collecte, à partir d'une matrice des distances entre les usines et tous les autres points du réseau, d'une table associant les quantités de déchets présents à chaque point du réseau et de la quantité de déchets à attribuer à chaque zone, le programme permet de créer pour chaque usine une zone de collecte de déchets. Ces zones sont toutes de même taille en termes de quantité de déchets. Ce programme permet de faire simultanément les zones de collecte de déchets de toutes les usines d'un même scénario ce qui est indispensable afin d'obtenir des emprises cohérentes les unes avec les autres. Simultanément signifie que le programme attribue tour à tour à chacune des usines un nœud du réseau. Le premier nœud attribué à chaque usine est celui situé le plus près de celle-ci ayant une quantité de déchets différente de 0 et ainsi de suite. Un nœud est utilisé une seule fois. En sortie, le logiciel de calcul matriciel fourni la liste des nœuds du réseau associés à chaque usine.

Ce même programme assure la construction des zones de distribution potentielles de chaleur en changeant les données en entrée.



Programme 5 : Programme de sélection des parcelles

Programme 3: Programme de création des zones de distribution ou de collecte

G : Gisement déchets en tonnes

N : Nombre d'usines

Figure 48 : Schéma opérationnel pour la méthanisation

b) Méthode pour déterminer lequel des scénarios minimise les distances à parcourir pour collecter les déchets

Pour savoir quel scénario (1 usine, 2 usines...) minimise la distance pour collecter les déchets, il faut respecter la démarche suivante :

- Obtenir du SIG une matrice donnant les distances entre le nœud routier de l'usine et les nœuds de la zone de collecte. Il y a donc autant de matrices que d'usines. Dans le scénario 1 usine il y a 1 matrice, 2 matrices dans le scénario 2 usines et ainsi de suite.
- Pour chaque matrice, on somme toutes les distances entre le nœud routier de l'usine et les nœuds de la zone de collecte.
- On additionne ensuite les sommes des distances issues de chaque matrice contenue dans un même scénario. Cette addition aura 2 membres pour le scénario 2 usines, 4 membres pour le scénario 4 usines et ainsi de suite.
- Enfin on compare les résultats obtenus dans la troisième étape afin de savoir quel scénario minimise la distance à parcourir pour collecter les déchets. On peut alors faire un graphique comparant les distances ainsi parcourues. Ces sommes ne reflètent pas les distances réellement parcourues par les camions mais leur comparaison permet de déterminer quel scénario minimisera les distances à parcourir. L'important ne réside pas dans les chiffres obtenus mais dans l'évolution de ces derniers selon les scénarios.

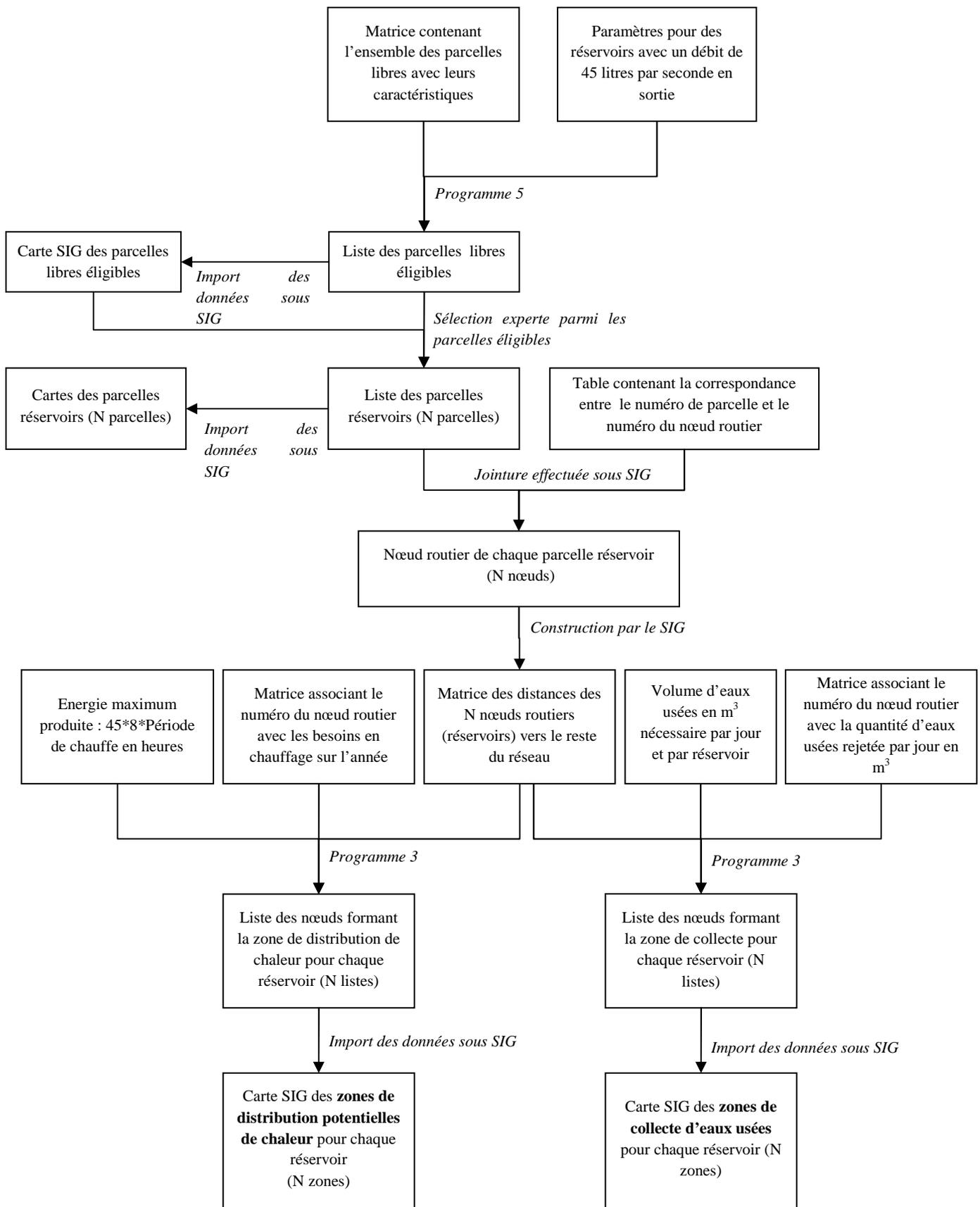
5.3 L'offre récupération chaleur des eaux usées

Nous allons détailler le processus opérationnel que nous avons choisi pour répondre à ce qui a été exposé pour l'offre récupération de chaleur des eaux usées dans la partie théorique.

La figure 49 rend compte de la démarche opérationnelle élaborée pour cette offre. Les flèches représentent une action et les cadres des données ou des cartes. Cette fois-ci la démarche s'effectue une seule fois puisque on a décidé de ne pas mettre en place de scénarios pour l'offre récupération de chaleur des eaux usées.

Les programmes utilisés sont les mêmes que pour la méthanisation. Comme le montre le diagramme on change uniquement les données en entrée.

Une fois que les zones de collecte sont déterminées, il est possible que celles-ci soient incohérentes dans leur constitution. En effet, comme on demande au programme d'attribuer les mêmes quantités d'eaux usées à chaque réservoir, il se peut que les zones qui terminent en dernier de se construire soient scindées en plusieurs parties. Les zones ne se terminent pas en même temps car tous les points du réseau ne possèdent pas la même quantité d'eaux usées (un nœud est attribué à chaque usine à tour de rôle, ce nœud attribué est celui le plus proche et qui n'a pas encore été attribué avec une quantité d'eaux usées strictement supérieure à zéro). Ce décalage dans la finition de l'établissement des zones implique donc que certaines zones devront prendre des nœuds qui seront détachés de leur zone principale puisque les autres nœuds autour de la zone principale seront déjà pris par les autres réservoirs. On peut alors adopter deux attitudes. Soit on laisse les zones telles qu'elles sont, soit on réattribue les zones qui ne sont pas attachées à leur zone principale à d'autres zones. Cette réattribution se fait avec un logiciel SIG. Ainsi, les zones de collecte, les débits en sortie de réservoir et par conséquent la quantité de chaleur pouvant être produite changent. Il faut donc relancer le programme 3, pour tous les réservoirs qui ont subi un changement dans leur zone de collecte d'eaux usées, en changeant la valeur du débit. On récupère alors la nouvelle liste des nœuds formant la zone de distribution potentielle de chaleur pour chaque réservoir dont la zone de collecte a été modifiée. Il faut alors refaire la cartographie des zones de distribution qui ont subi des changements.



Programme 5 : Programme de sélection des parcelles

Programme 3: Programme de création des zones de distribution ou de collecte

N : Nombre de réservoirs avec
$$N = \frac{\text{Nombre d'habitants} \times \text{Production journalière d'eaux usées par habitant}}{\text{Nombre de secondes dans une journée} \times \text{Débit en sortie de réservoir}}$$

Figure 49 : Schéma opérationnel pour la récupération de chaleur des eaux usées

6. La rentabilité du réseau

6.1 Rentabilité globale sur SIG

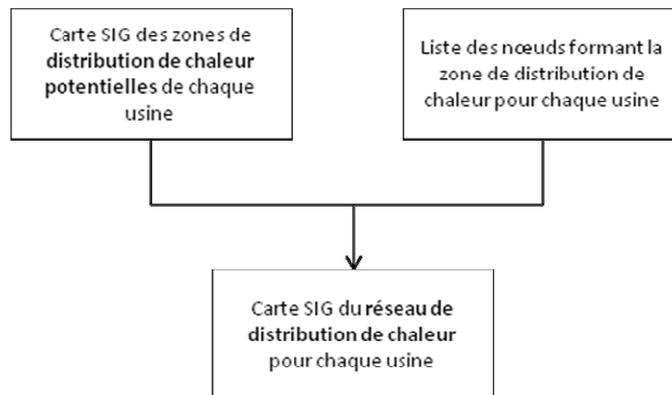


Figure 50 : Schéma opérationnel pour la rentabilité globale du réseau

Après avoir déterminé les zones de distribution potentielles de chaque usine, il s'agit de reconstituer un véritable réseau de chaleur.

Pour pouvoir comparer la rentabilité des réseaux de chaleur en fonction du tissu urbain, nous les avons créés suivant deux méthodes.

La première consiste à cibler en priorité l'habitat collectif qui concentre des besoins importants sur une surface faible, ce qui permet a priori d'obtenir la meilleure rentabilité. On crée le réseau qui relie le producteur aux zones d'habitat collectif se trouvant dans la zone de distribution potentielle, ou en bordure de celle-ci. Leurs besoins sont couverts en priorité, ensuite, on cherche à couvrir les besoins des logements individuels se trouvant le long de la canalisation qui relie le producteur aux immeubles. S'il reste encore de la capacité de production de chaleur, on passe à la zone d'habitat collectif suivante et on renouvelle l'opération jusqu'à ce que la capacité maximale de production de chaleur soit atteinte.

La seconde consiste à desservir des ensembles pavillonnaires dans la limite de la capacité des unités de production de chaleur.

Cela étant fait, on obtient la longueur totale du réseau en additionnant la longueur de chacun des arcs qui le compose. Cette longueur, divisée par la quantité d'énergie transportée par ce réseau, donne la densité thermique de celui-ci.

Dans le cas de la méthanisation et du bois, on considère que l'on couvre 100% des besoins en chauffage de chaque logement. Pour les eaux usées, par contre, on ne couvre que 33% des besoins du logement et une autre source vient compléter, via le réseau de chaleur. On calcule donc la densité thermique sur la totalité des besoins des bâtiments desservis et pas seulement sur la part fournie par la chaleur récupérée des eaux usées.

6.2 Rentabilité locale à l'aide d'un outil de calcul matriciel

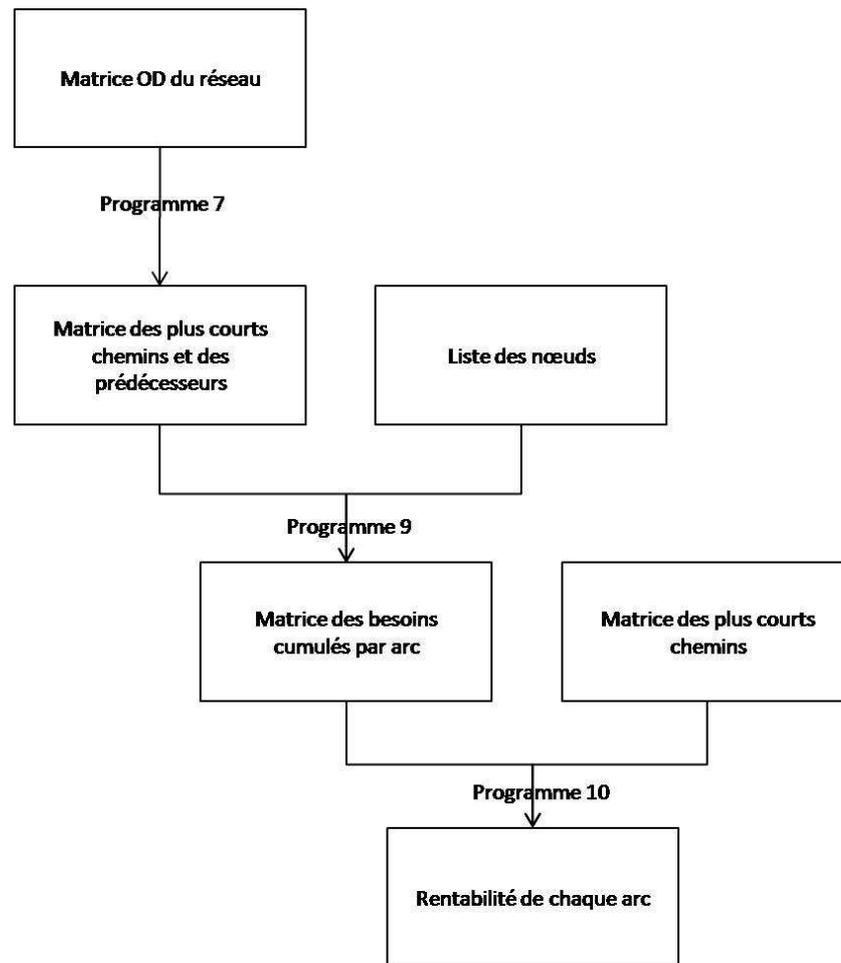


Figure 51: Schéma opérationnel pour la rentabilité locale du réseau

En complément du calcul de la rentabilité du réseau dans son ensemble, on peut calculer la rentabilité de chaque arc.

Pour cela, on reprend la matrice OD du réseau, il s'agit de la matrice origine destination qui indique les arcs existants et leur longueur. Grâce à un algorithme de Floyd, on obtient la matrice des plus courts chemins ainsi que celle des prédécesseurs qui nous permettra ensuite de savoir par quel chemin on passe pour se rendre d'un point à un autre (Programme 7).

On détermine ensuite les besoins cumulés par arc. Pour cela, on utilise la matrice des prédécesseurs obtenue précédemment ainsi que le tableau associant les besoins à chacun des nœuds. On retrace le chemin parcouru pour se rendre d'un consommateur à son producteur le plus proche (celui auquel il sera relié par le réseau de chaleur si cela est possible) et on attribue les besoins du consommateur à chaque arc emprunté (Programme 9).

Enfin, en prenant la matrice des plus courts chemins et celle des besoins cumulés, on calcule la rentabilité de chaque arc en divisant les besoins cumulés de l'arc (i, j) par sa longueur (Programme 10).

PARTIE 3
APPLICATION A UN CAS
D'ETUDE ET SCENARIOS
PROSPECTIFS : LE NOYAU
URBAIN DE TOURS

Les parties précédentes nous avons mis en place un outil permettant de sélectionner les parcelles d'implantation d'unités de production de chaleur grâce à des énergies alternatives, de visualiser l'espace urbain pouvant être potentiellement desservi par ces générateurs d'énergie, ainsi que de générer des réseaux de chaleur réalistes sur un espace urbain donné.

Il est alors intéressant de prendre l'exemple d'un territoire sur lequel on puisse mettre en application et valider l'outil méthodologique créé. Le but de cette troisième partie est donc d'obtenir et d'analyser les résultats sur un espace urbain choisi.

Le territoire d'étude doit réunir certaines conditions :

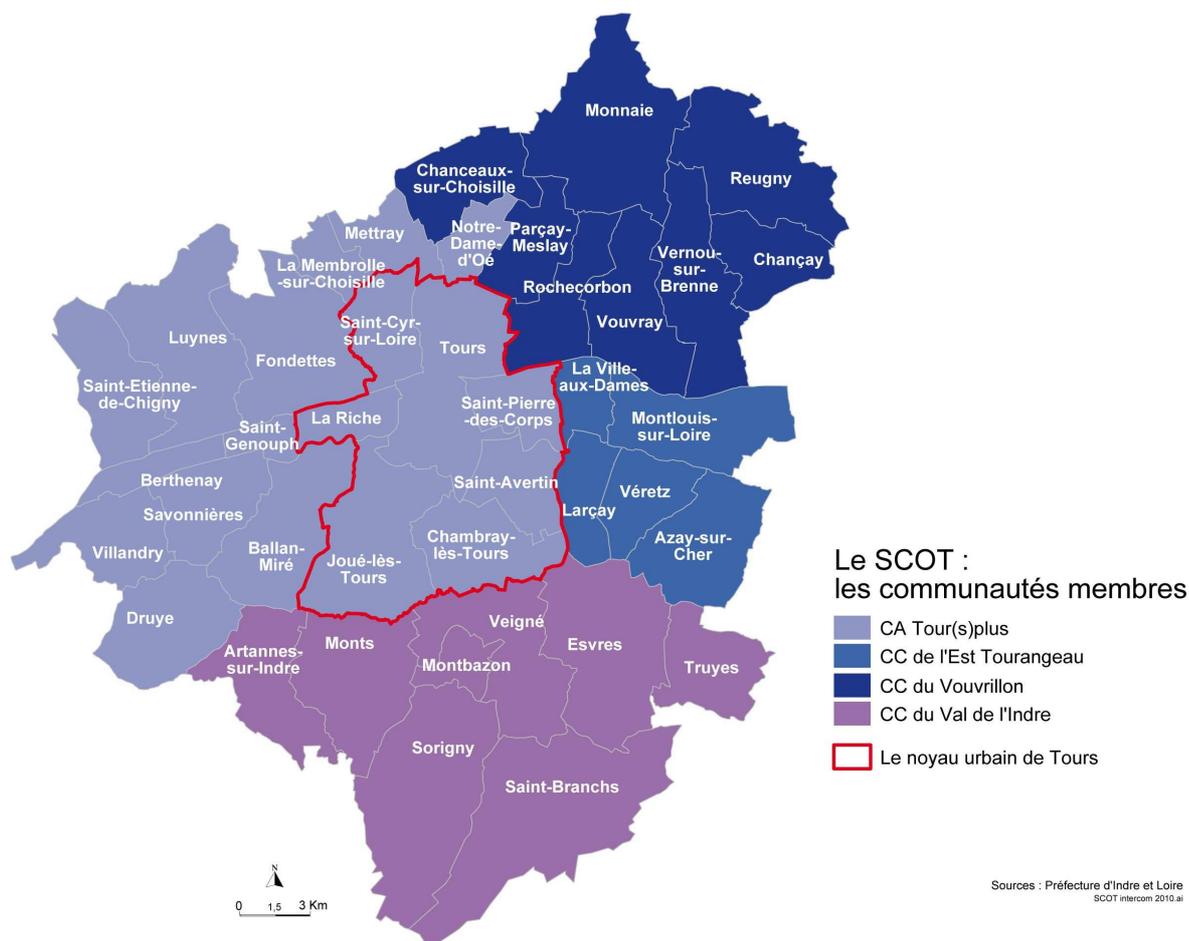
- Il doit être assez dense sinon un réseau de chaleur ne peut être envisageable car non rentable.
- Il faut qu'il contienne une population et une superficie assez importante (ville moyenne, agglomération...) pour permettre d'obtenir plusieurs parcelles d'implantation et ainsi de créer un réseau d'unités de production d'énergie au sein du territoire.

Le choix s'est porté sur le territoire du Noyau Urbain de Tours. C'est un espace urbain composé de 7 communes appartenant à la Communauté d'Agglomération Tourangelle Tours Plus. Cette dénomination de « Noyau urbain de Tours » est définie dans le SCoT de l'Agglomération Tourangelle.

Le tableau suivant détaille pour chacune de ces 7 communes : sa population, sa superficie et sa densité:

Nom de la commune	Population 2006	Superficie (km ²)	Densité (hab/km ²)
Chambray-lès-Tours	10 534	19,44	541,87
Joué-lès-Tours	36 270	32,55	1114,29
La Riche	9 651	8,19	1178,39
St Avertin	14 641	13,22	1107,49
St Cyr-sur-Loire	16 375	13,48	1214,76
St Pierre-des-Corps	15 651	11,31	1383,82
Tours	137 119	33,07	4146,33
Noyau Urbain de Tours	240 241	131,26	1830,27

Figure 52 : Tableau de la structure des communes appartenant au Noyau Urbain de Tours



Carte 1 : Insertion du Noyau Urbain de Tours au sein du périmètre du SCoT de l'Agglomération Tourangelle

La ville de Tours est la préfecture du département d'Indre-et-Loire, la plus grande ville de la région Centre et la 18^{ème} unité urbaine de France avec 307 096 habitants. Pour le Noyau Urbain de Tours, la population en 2006 est de 240 241 habitants sur 131,26 km², soit une densité de 1830,27 habitants/km².

Cet espace répond donc bien aux conditions de superficie, de densité et de population. Il dispose de nombreuses parcelles en zone à urbaniser, en zone agricole... qui sont des parcelles potentiellement éligibles à l'implantation des unités de production d'énergie. Par ailleurs, les technologies utilisées dans notre étude avaient été définies auparavant en fonction du territoire d'étude que l'on serait amené à choisir, ici en l'occurrence le Noyau Urbain de Tours. Par conséquent, le choix de cet espace urbain est donc totalement pertinent pour pouvoir appliquer notre outil méthodologique.

1. Le contexte de la demande énergétique du Noyau Urbain de Tours

1.1 Le parc de logement

a) Le nombre de logements individuels et collectifs par période de construction

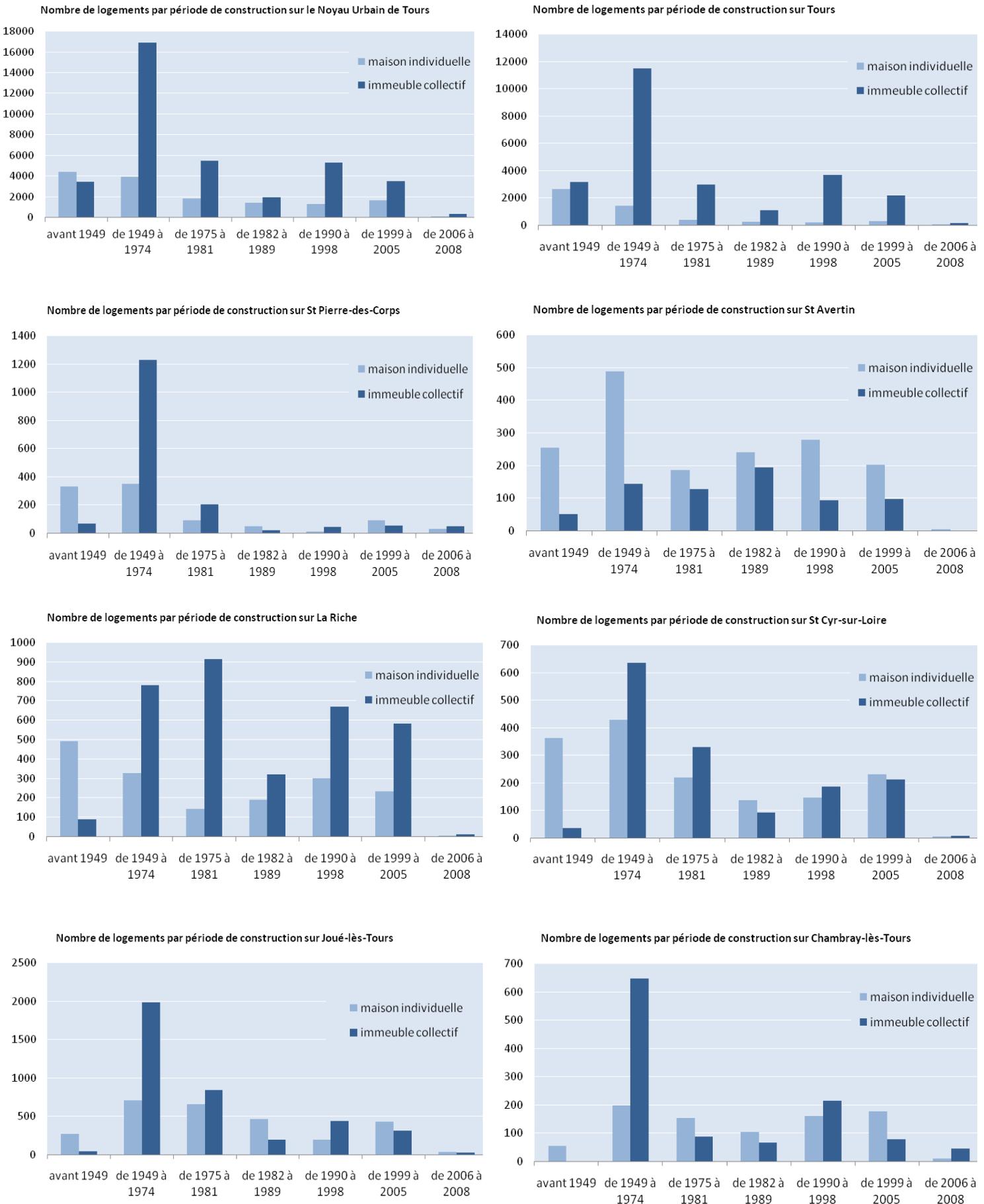


Figure 53 : Histogrammes du nombre de logements par période de construction par commune du NUT

Globalement sur le Noyau Urbain de Tours, il y a 28% de maisons individuelles et 72% de logements collectifs. L’histogramme suivant montre la part d’immeubles collectifs et de maisons individuelles selon les communes. On voit que les communes du Noyau Urbain de Tours ont un parc majoritairement composé d’immeubles collectifs (82% à Tours), sauf St Avertin dont 70% du parc est composé de maisons individuelles.

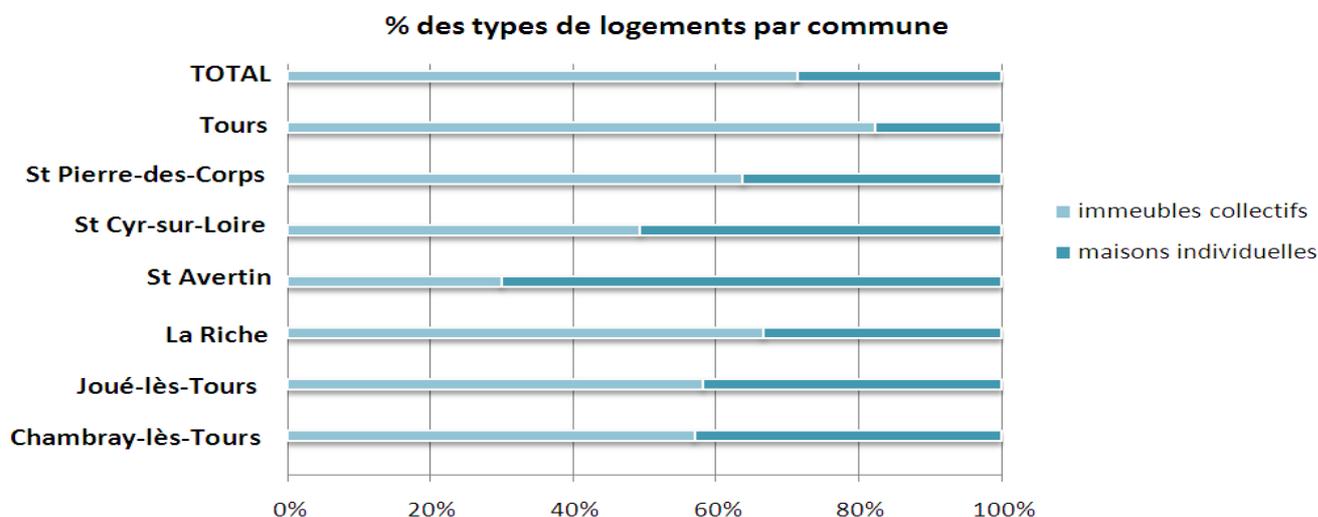


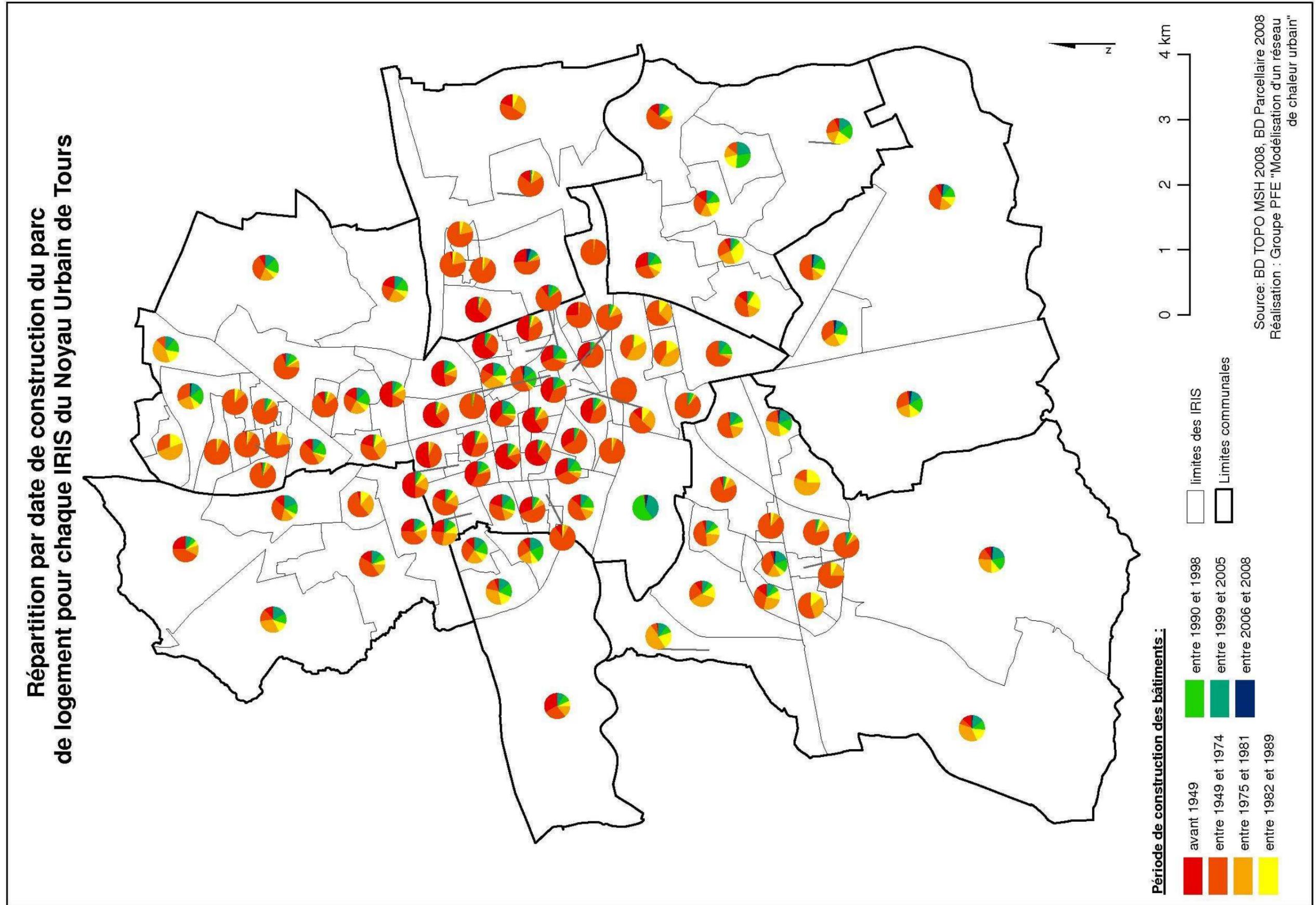
Figure 54 : Pourcentage des immeubles collectifs/maisons individuelles par commune

Près de la moitié des constructions de logements collectifs s’est faite lors de la période 1949-1974. Dans les années 80, il y a eu une très forte diminution du nombre de constructions de logements collectifs, mais une reprise a eu lieu à partir des années 90. Ces proportions varient selon les communes mais la tendance générale reste la même à part pour St Avertin où la construction de logements collectifs suit une tendance inverse : peu de constructions sur la période 1949-1974 et depuis les années 1990, alors qu’il y a eut un léger pic dans les années 80.

Le nombre de constructions de maisons individuelles diminue à chaque période de construction depuis 1949 avec un sursaut à partir des années 1990. Ceci vient du fait que l’on se trouve dans un milieu très urbain qui favorise la construction de collectifs par rapport à de l’individuel. St Avertin reste toujours l’exception avec un parc de logements individuels plus important que les logements collectifs et dont le nombre de constructions de logements individuels reste stable.

En conclusion, le parc de logements est assez homogène sur le Noyau Urbain de Tours, avec une forte urbanisation sur la période 1949-1974 et depuis les années 1990. Seul St Avertin reste à dominance de pavillons individuels depuis toujours, alors que le reste du secteur d’étude est plutôt à dominance de logements collectifs. Le parc de logements collectifs est actuellement assez ancien mais la dynamique à l’œuvre aujourd’hui tend à rajeunir fortement ce parc avec la construction de petits collectifs.

b) La répartition du bâti par période de construction et par IRIS



Carte 2: Répartition par date de construction du parc de logement pour chaque IRIS du Noyau Urbain de Tours

La carte 2, illustrant les périodes de construction des logements par IRIS permet de déterminer les zones composées de bâtis anciens et celles composées de bâtis plus récents. Pour chaque IRIS on dispose de la proportion du nombre de logements par période de construction.

Tours Centre présente l'urbanisation la plus ancienne. St Pierre des Corps, Joué-Centre et le Centre de Tours-Nord ont également une forte proportion de bâtis assez anciens. A l'opposé, les communes de St-Avertin, Chambray-lès-Tours et La Riche sont très récentes avec plus de 50% des logements construits après 1990. Le Sud de Joué-lès-Tours, le Nord de Tours-Nord et la commune de St Cyr-sur-Loire sont également de construction assez récente. Plus généralement, ce sont toutes les zones périphériques de notre périmètre d'étude qui ont été construites assez récemment. La seule exception est le quartier des 2 Lions qui est un quartier nouveau en plein cœur du Noyau Urbain de Tours.

Cela permet ainsi d'identifier les IRIS du périmètre d'étude qui possèdent des bâtis anciens et donc qui sont des gros consommateurs d'énergie. A l'inverse, les IRIS où les logements sont plus récents ont une consommation d'énergie par mètre carré beaucoup plus faible et sont donc moins énergivores.

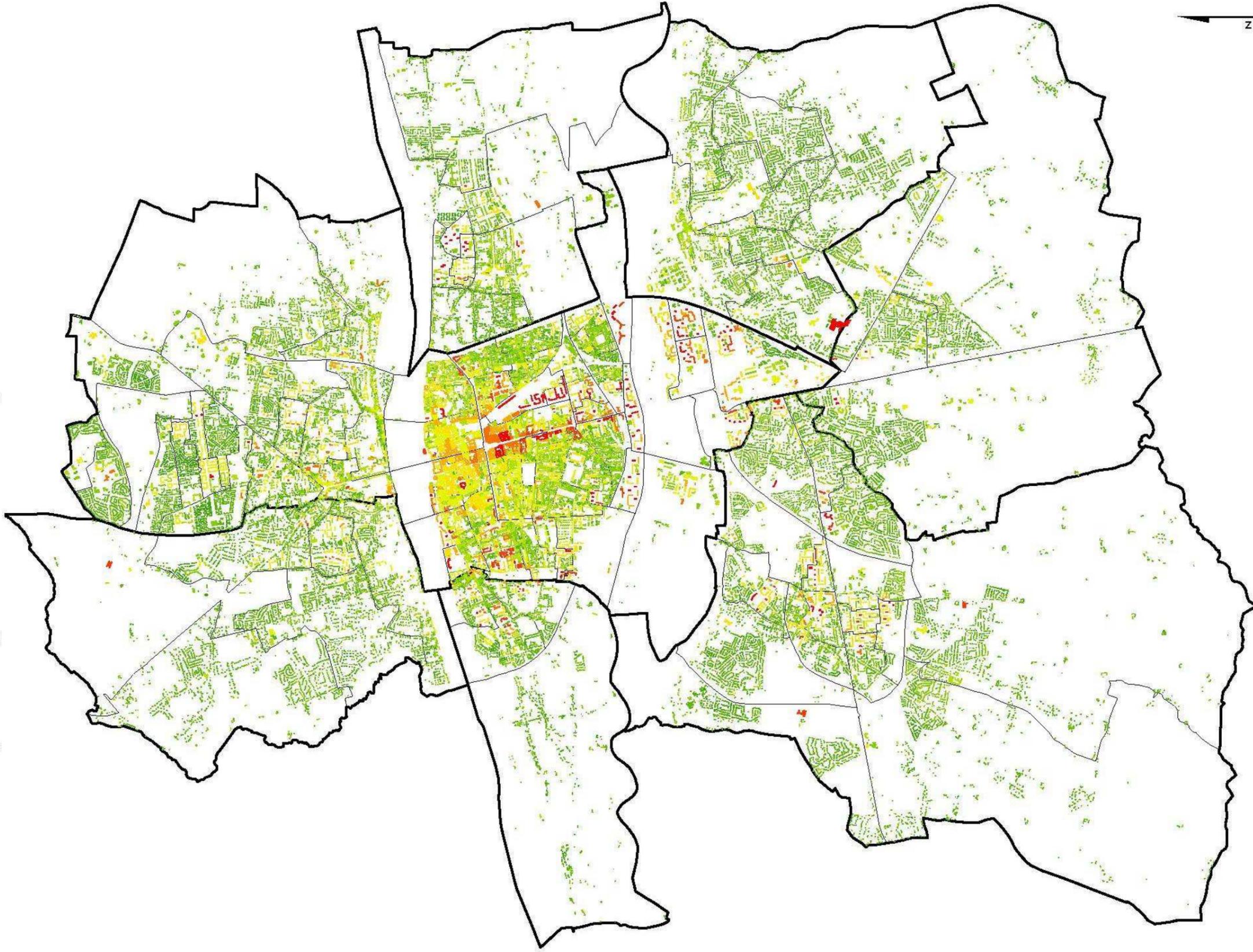
c) Le plan d'épannelage

La carte 3 montre le plan d'épannelage des bâtiments du Noyau Urbain de Tours. Il va venir confirmer les conclusions que l'on avait faites en comparant le parc de logements individuels et celui de logements collectifs. La presque intégralité des grands immeubles (+ de 5 étages) se situent au niveau de Tours Centre (autour de l'avenue Grammont, les 2 Rives...) et de Tours Sud (les Fontaines). Tours Nord et Joué-lès-Tours présentent également quelques immeubles collectifs et dans les autres communes on trouve seulement quelques petits collectifs (entre R+2 et R+4).

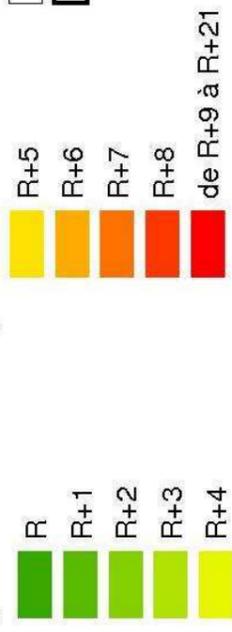
Globalement, plus on s'éloigne du centre vers la périphérie du Noyau Urbain de Tours, moins les logements sont hauts.

On peut donc déjà conclure que les zones possédant des logements collectifs assez hauts et donc une densification importante (Tours, Joué-lès-Tours...) auront des consommations d'énergie globales beaucoup plus fortes. A contrario, les communes composées majoritairement de pavillons (St Avertin, La Riche, Chambray-lès-Tours, St Cyr-sur-Loire) auront des consommations d'énergie beaucoup plus faibles.

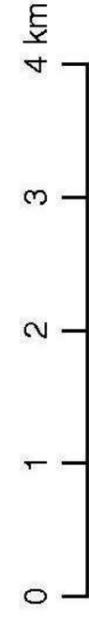
Plan d'épannelage des bâtis du Noyau Urbain de Tours



Nombre d'étages avec 1 étage = 3m :
(R = Rez de chaussée)



□ limites des IRIS
□ Limites communales



Source: BD TOPO MSH 2008, BD Parcellaire 2008
Réalisation : Groupe PFE "Modélisation d'un réseau de chaleur urbain"

1.2 La construction du réseau de distribution et de collecte

Cette partie consiste à appliquer la méthode de construction d'un réseau présentée précédemment en l'appliquant au Noyau Urbain de Tours en guise d'exemple.

a) Les contraintes géographiques et urbaines

i) La Loire et le Cher

Ce fleuve et cette rivière constituent des barrières ayant un impact direct sur la distribution et la collecte. Il n'est possible de traverser ces cours d'eau qu'au niveau des ponts. Il est intéressant ici d'observer les répercussions de ces barrières géographiques sur les distances réseaux parcourues.

Les deux figures suivantes représentent la distance la plus courte à parcourir en mètres dans le cas où l'on prend en compte la Loire (figure 55) puis dans le cas où l'on ne considère pas la Loire comme une barrière naturelle (figure 56).

La distance réseau dans le premier cas est pratiquement 4,5 fois supérieure à celle du deuxième cas. Cette comparaison montre bien l'importance de considérer ces barrières dans le modèle.

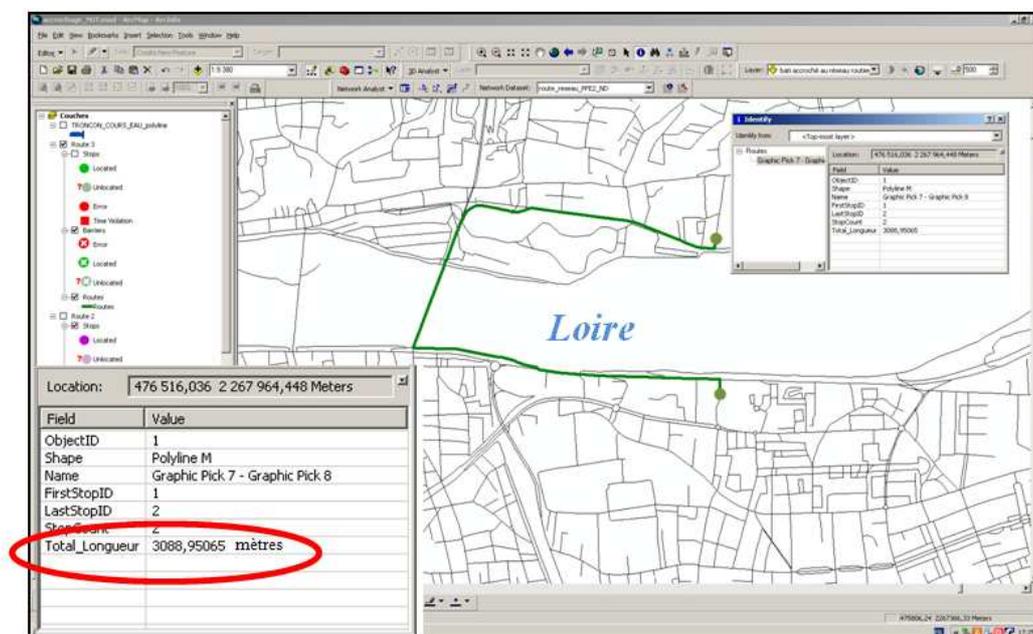


Figure 55: Exemple d'une distance réseau tenant compte d'une barrière géographique, la Loire

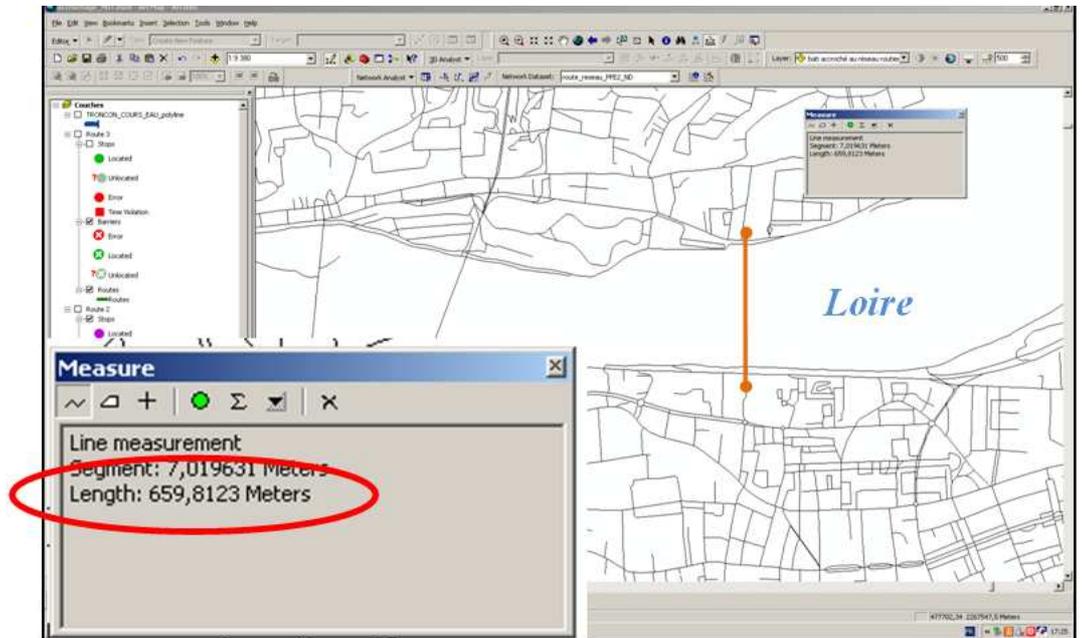


Figure 56 : Exemple d'une distance réseau ne tenant pas compte d'une barrière géographique, la Loire

Maintenant que nous avons montré l'impact de ces obstacles, il est intéressant de voir s'il existe d'autres barrières sur le territoire étudié.

ii) Le réseau ferré

Il en va de même pour le réseau ferré. En effet, la gare de Tours arrive en plein centre ville, ce qui implique un large réseau ferré. L'impact d'une telle barrière n'est pas négligeable.

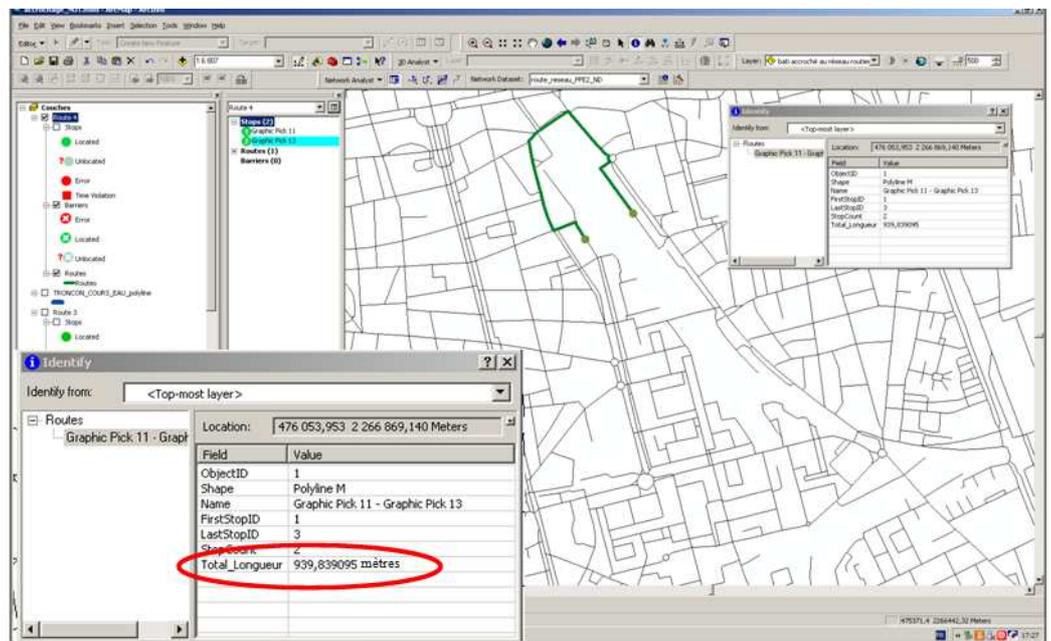


Figure 57 : Exemple d'une distance réseau tenant compte d'une barrière urbaine, le réseau ferré

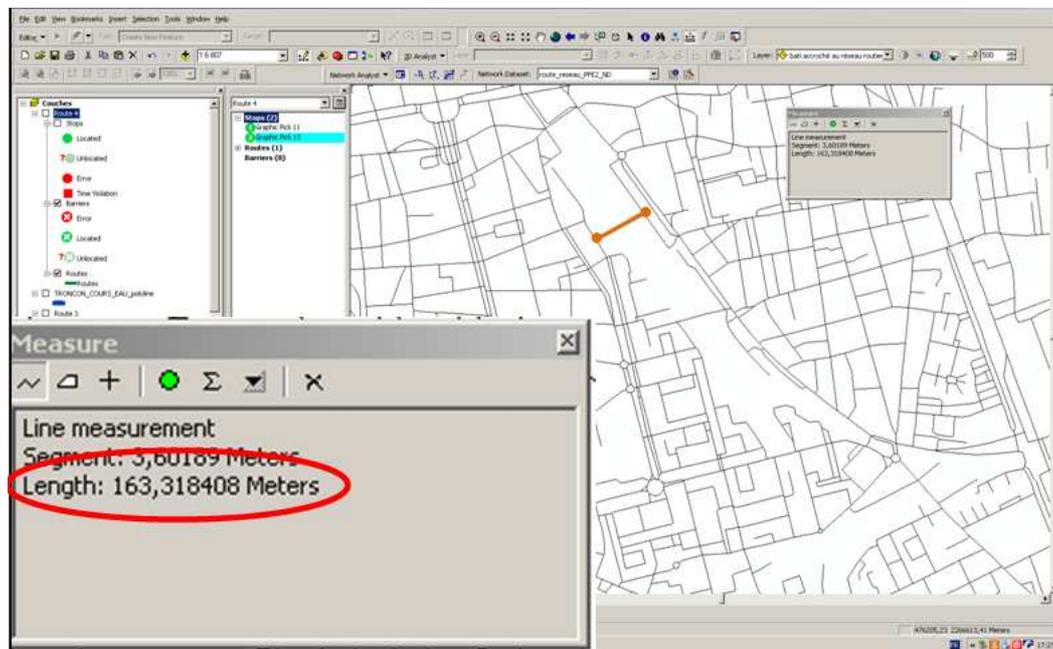


Figure 58: Exemple d'une distance réseau ne tenant pas compte d'une barrière urbaine, le réseau ferré

Ci-dessus, deux illustrations montrant la distance réseau entre deux points de part et d'autre de la voie ferrée en centre ville de la ville de Tours. La figure 57 prend en compte la distance réseau et la figure 58 la distance à vol d'oiseau.

Dans le cas présenté ci-dessus, on atteint une distance réseau pratiquement six fois supérieure que celle à vol d'oiseau.

iii) L' autoroute A10 et le périphérique

Le Noyau Urbain de Tours est traversé par l'autoroute A10. En plus de ne pas pouvoir être assimilée à un réseau de chaleur ou de collecte d'eaux usées (en raison de son statut et du fait qu'elle soit surélevée), cette infrastructure routière constitue une barrière importante dans le tissu urbain même si les connections permettant de la traverser sont relativement fréquentes. Il en va de même pour le périphérique.

La BD Topo permet de classer les infrastructures routières suivant leur importance et leur typologie. L'autoroute A10, le périphérique et les bretelles d'autoroutes seront supprimées de la base de données qui servira de support pour la construction du réseau de distribution et de collecte.

b) La construction du réseau

Dans notre cas, le réseau est construit par l'intermédiaire du module Network Analyst d'ArcGis selon la procédure expliquée précédemment. La matrice créée par la construction du réseau donne les chemins les plus courts en distances réseaux de chaque nœud vers chaque autre nœud.

c) La simplification du réseau

Le réseau obtenu est constitué d'environ 15 000 nœuds correspondants à tous les carrefours du réseau viaire (nœuds primaires). Parmi ces nœuds, des réseaux isolés ont dû être supprimés pour satisfaire la condition de connexité d'un graphe de réseau. On obtient alors 14871 nœuds.

Lors de l'accrochage des bâtiments au réseau un certain nombre d'habitations n'ont pu être raccrochées à celui-ci. Le nombre d'habitants pris en compte pour notre application passe ainsi de 240 241 à 238 397 soit une diminution de 0,76% que nous considérons comme négligeable.

En ce qui concerne la distribution et la collecte, la matrice des chemins minimaux sera donnée depuis l'unité de production ou de récolte vers tous les autres nœuds du réseau.

1.3 Les besoins d'énergie : application au cas du Noyau Urbain de Tours

a) Paramètres utilisés pour calculer les besoins en chauffage

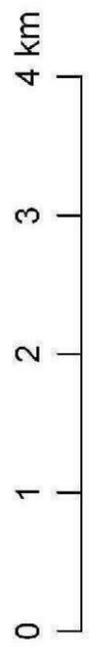
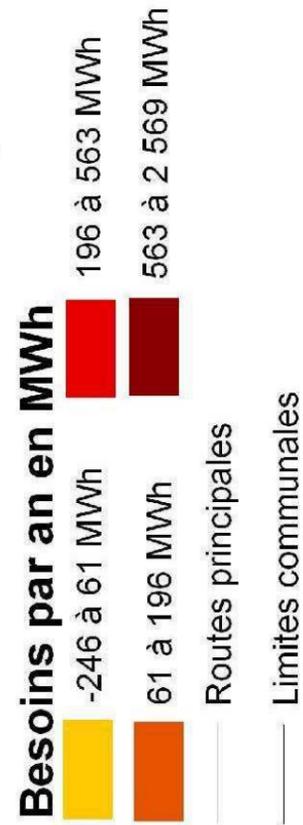
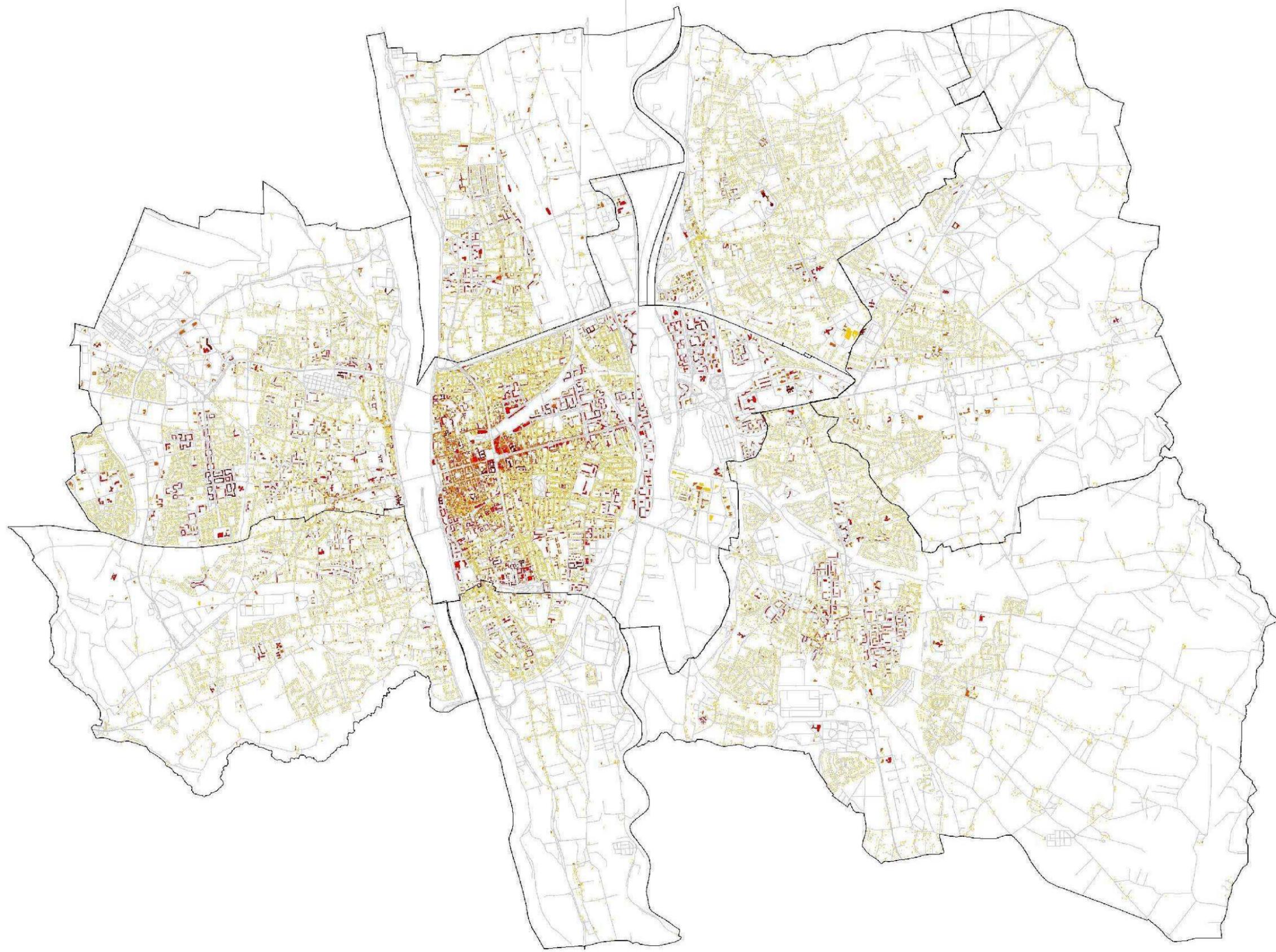
Paramètres	Valeur
Nombre d'heures de chauffe	5760 heures
Dégrés-Heures	66391 DH
Latitude / Longitude	47°22' N / 0°41'E
Fraction d'insolation	42%

b) Résultats

La carte 4 représente les besoins de chauffage par an en MWh. Cette carte ne traite donc pas de l'efficacité énergétique des bâtiments, mais elle permet de distinguer les endroits où les constructions qui ont une demande importante. Cela peut être utilisé pour distinguer les zones où il serait pertinent d'implanter un réseau de chaleur.

On peut analyser cette carte selon trois zones. Tout d'abord, le territoire au Sud du Cher est occupé en quasi-totalité par des quartiers résidentiels. On se rend compte que l'étalement urbain ne permet pas de concentrer la demande. On peut cependant noter deux endroits qui diffèrent : le quartier des Fontaines et le centre de Joué-lès-Tours. Ce sont quasiment les seuls à posséder des immeubles d'habitation de grande hauteur, et donc une concentration de besoins importante. Entre le Cher et la Loire, la demande est élevée, notamment dans le centre historique de Tours, puisque le tissu urbain est très resserré. Cela est dû aux surfaces habitables importantes et à l'âge du bâti. Il faut cependant relativiser ces résultats par rapport aux limites de notre méthode de calcul, car cette zone contient de très nombreux immeubles mitoyens. Troisième morceau de territoire, au Nord de la Loire : on y retrouve un bâti assez hétérogène, avec à la fois des immeubles de grande hauteur, et des quartiers résidentiels au fur et à mesure que l'on s'éloigne de Tours. La demande est assez dispersée, sauf pour un quartier d'immeubles collectifs qui concentre plusieurs constructions de grande taille.

Besoins annuels de chauffage pour les bâtiments du Noyau Urbain de Tours



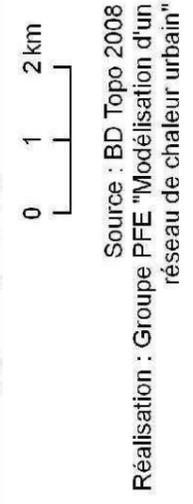
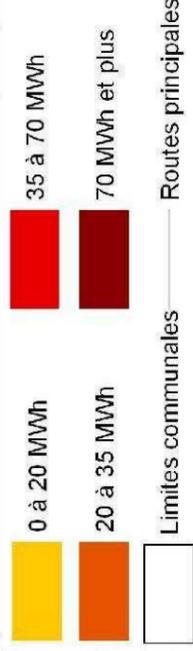
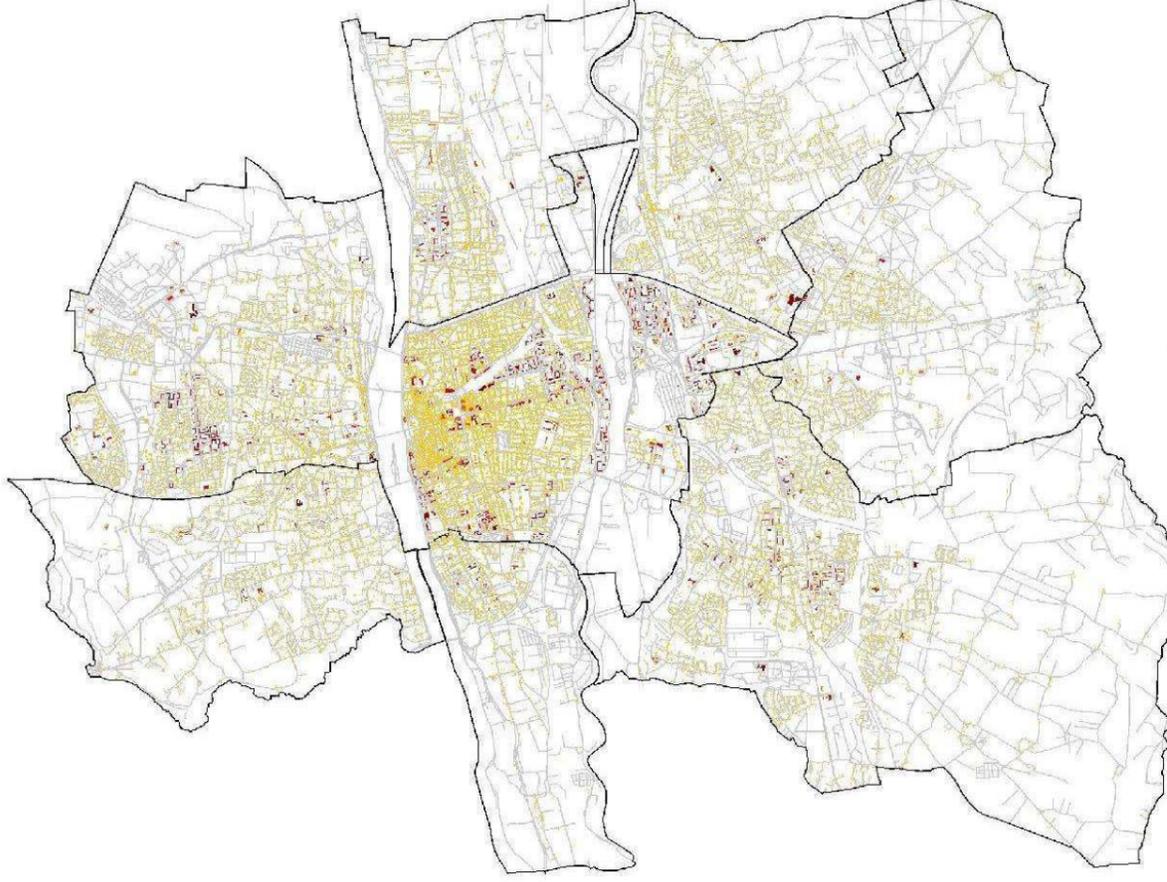
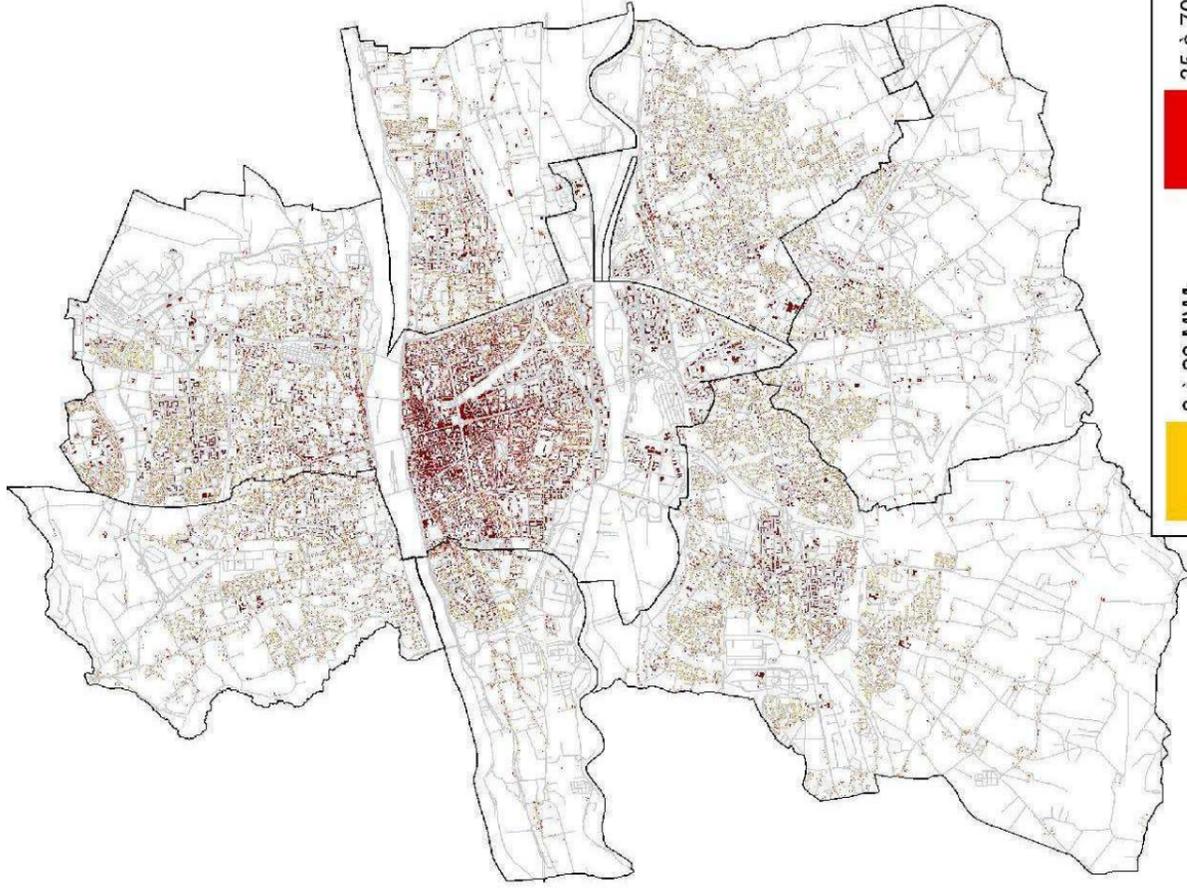
Réalisation : Groupe PFE "Modélisation d'un réseau de chaleur urbain"
Source : BD Topo 2008

Carte 4: Besoins annuels de chauffage pour les bâtiments du Noyau Urbain de Tours

Différents postes pris en compte pour estimer les besoins sur le Noyau Urbain de Tours

Déperditions par l'enveloppe

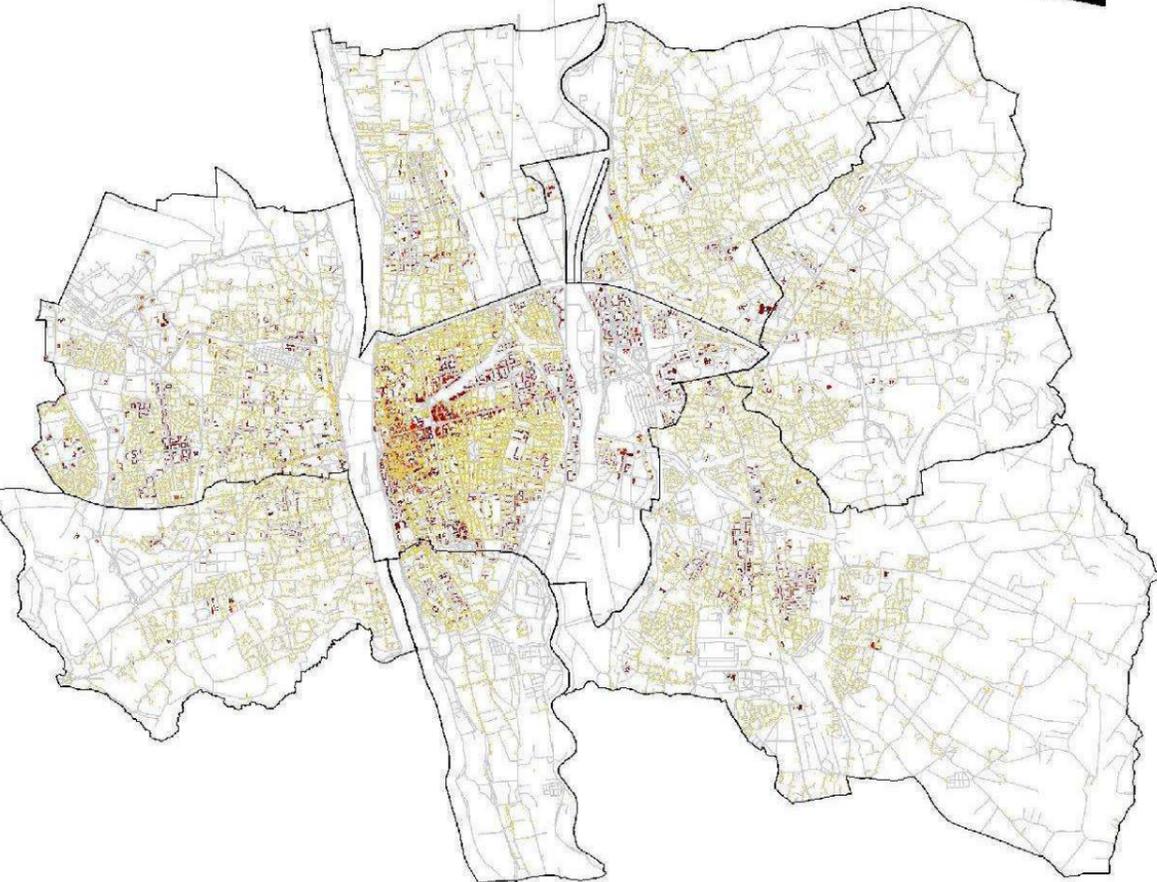
Déperditions par la ventilation



Apports internes



Apports solaires



Carte 5 : Différents postes pris en compte pour estimer les besoins sur le Noyau Urbain de Tours

La carte 5 détaille les différents postes en gardant la même échelle, afin de pouvoir les comparer entre eux. On peut donc s'intéresser aux chiffres de la demande :

Apports internes	Apports solaires	Total
540 GWh	450 GWh	990 GWh
54,5 %	45,5 %	100 %

Déperditions par l'enveloppe	Déperditions par la ventilation	Total
2903 GWh	97 GWh	3000 GWh
96,8 %	3,2 %	100 %

Déperditions par le vitrage	Déperditions par les parois	Total
1059 GWh	1844 GWh	2903 GWh
36,5 %	63,5 %	100 %

Figure 59: Tableaux détaillés des besoins par poste

Concernant les apports, on remarque que les deux postes sont à peu près équivalents (54,5 % et 45,5 %). Cela se voit sur la carte précédente avec des représentations similaires. Les apports solaires sont pourtant supérieurs aux apports internes à l'origine, mais, comme on a pu le voir, on doit leur appliquer différentes diminutions (effet de masque, couverture nuageuse...) pour essayer de modéliser au mieux la réalité.

Pour les déperditions, on peut comparer entre eux les chiffres des trois postes (ventilation, vitrage, parois). Les pertes par la ventilation, avec 3,2 %, sont négligeables par rapport à l'énergie perdue par l'enveloppe (vitrage plus parois).

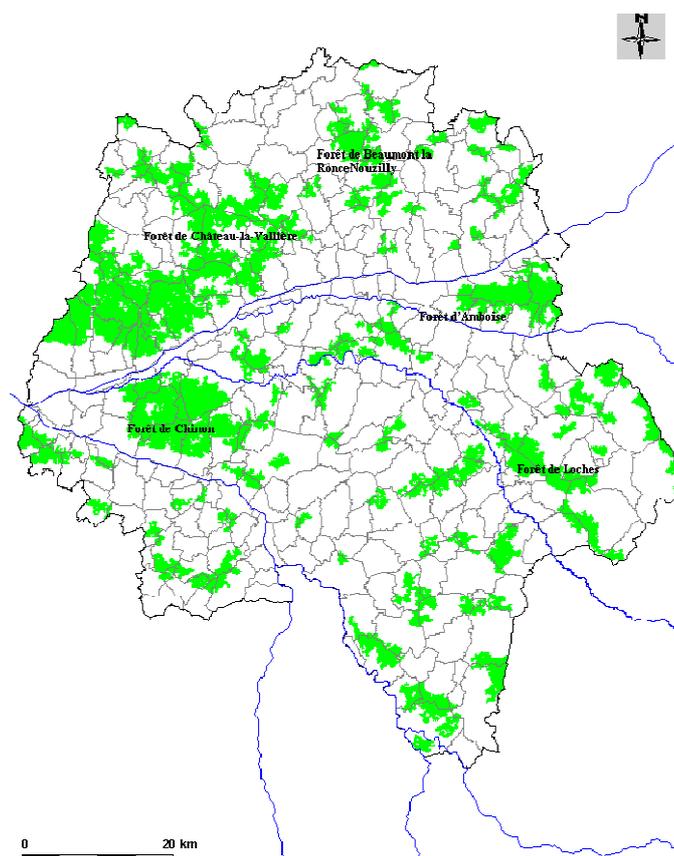
Dans le détail des déperditions par l'enveloppe, on s'aperçoit que les pertes par le vitrage atteignent 36,5 %, alors que les taux de surfaces vitrées varient entre 15 et 20%. Cela montre l'importance de construire des habitations avec des vitrages de bonne qualité isolante.

1.4 L'offre bois

a) La ressource bois en Indre-et-Loire.

Estimation du potentiel de production des forêts d'Indre-et-Loire:

En Indre-et-Loire, la surface de forêt (privée et publique) est de 150 100 ha. Les principaux massifs sont représentés dans la carte 6 ci-dessous. La majeure partie des forêts d'Indre-et-Loire sont feuillues (70% contre 30% de forêts de résineux). 24% de la superficie du département est boisée.



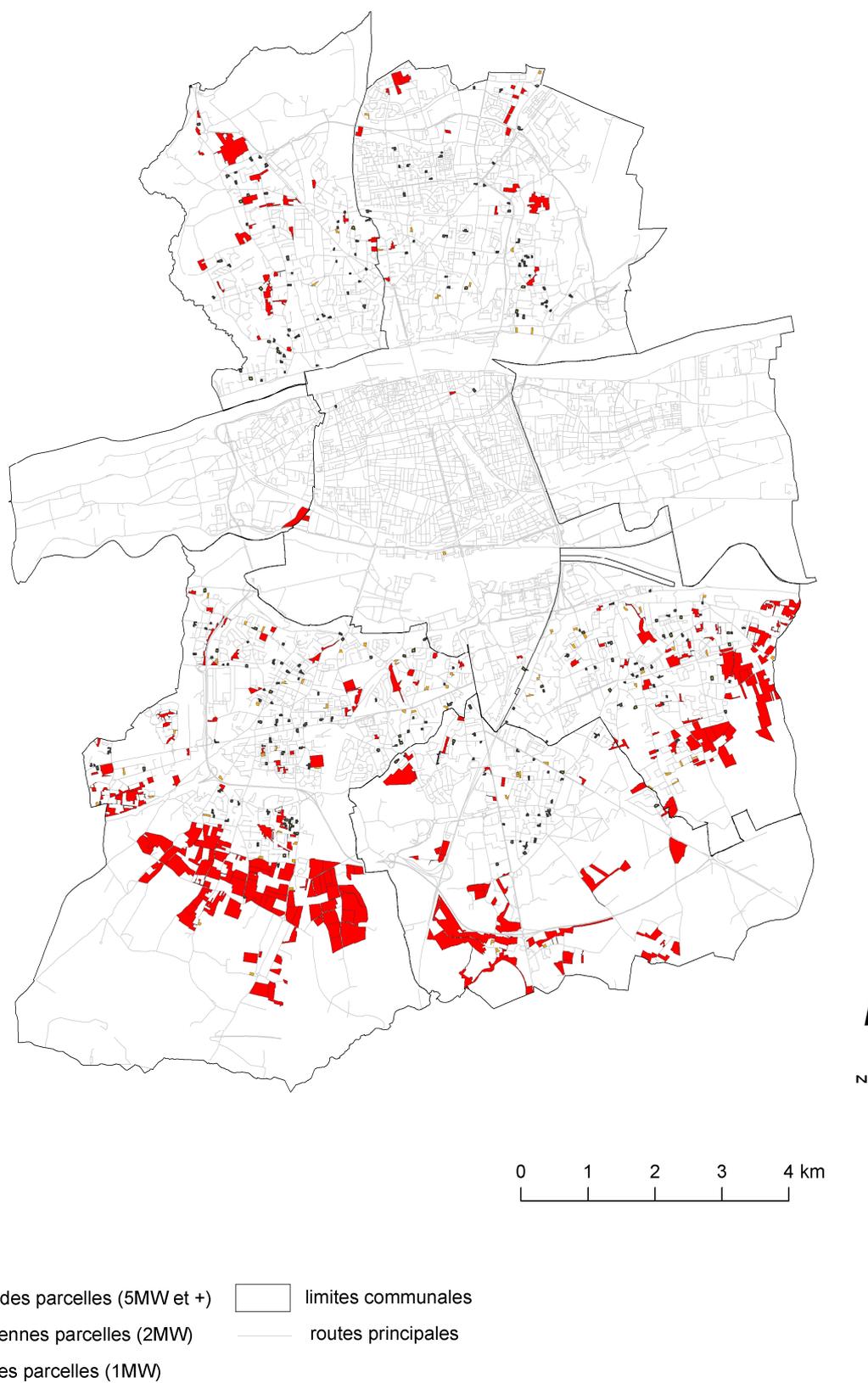
Carte 6 : Les principaux massifs forestiers d'Indre-et-Loire (source : DDAF 37)

D'après les données que nous avons choisies (production annuelle de 3 t/ha), les forêts d'Indre-et-Loire produisent 450300 tonnes de bois par an. Seulement 290 000 m³ soit 150000 à 200000 tonnes sont prélevées actuellement. La forêt n'est donc pas exploitée au maximum de son potentiel.

b) Détermination des espaces urbains pour l'installation des chaufferies

La méthode de sélection précédemment expliquée a été appliquée au cas de notre territoire d'étude. Ainsi, après la première sélection automatisée nous obtenons la carte 7 représentant les espaces urbains disponibles au sein du Noyau Urbain de Tours

Les parcelles éligibles pour les chaufferies bois avant la sélection à dire d'expert



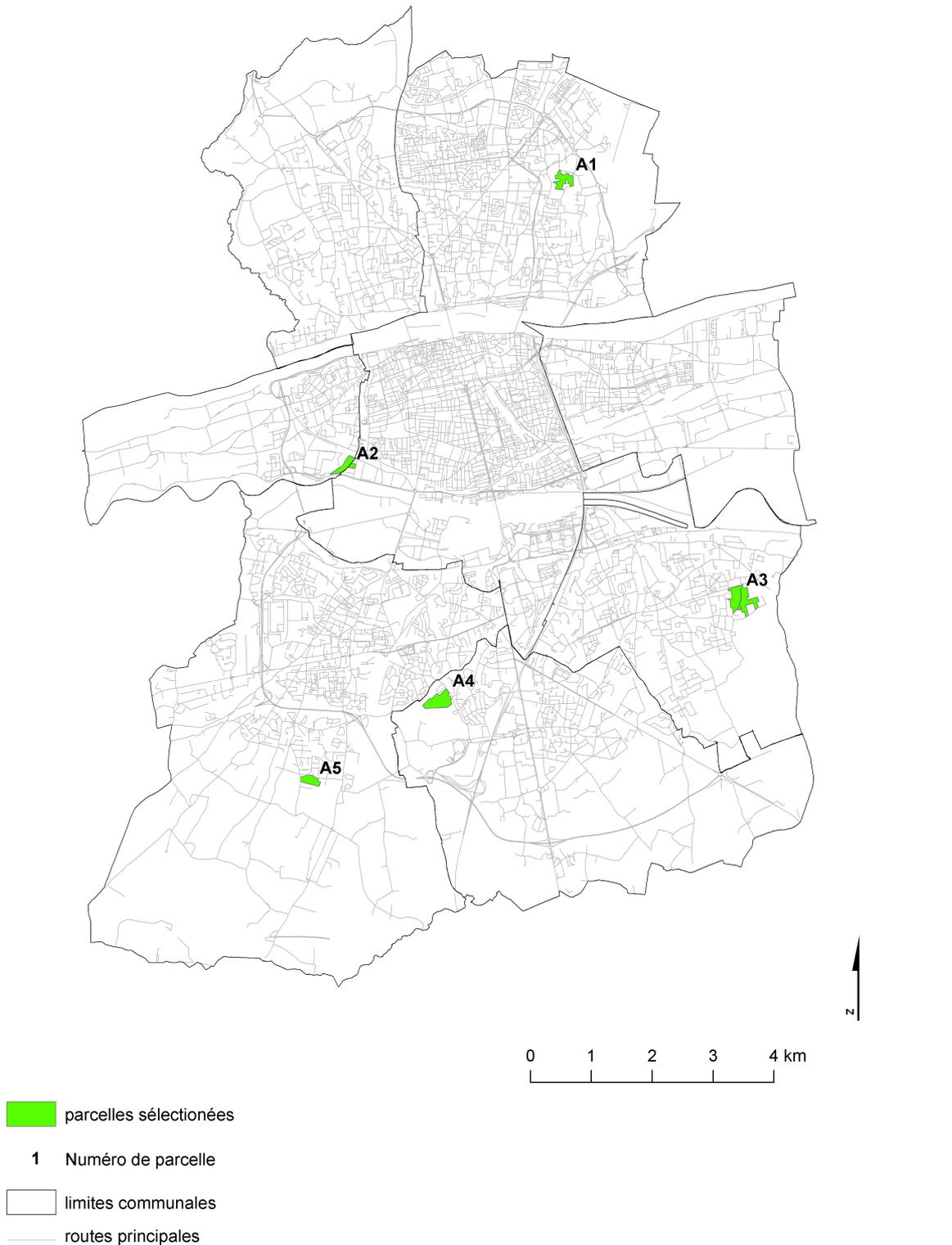
Source : BD Topo 2008
Réalisation : Groupe PFE 'Modélisation d'un réseau de chaleur urbain'

Carte 7 : Parcelles éligibles pour les chaufferies bois avant la sélection à dire d'expert

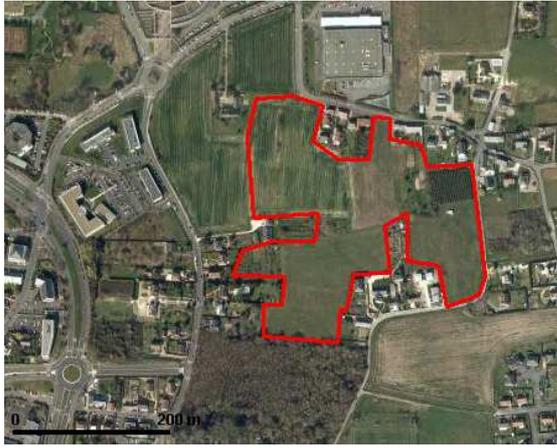
Cette carte montre l'emplacement des parcelles éligibles dans les trois catégories de chaufferie. Par catégories nous obtenons 260 petites parcelles, 71 parcelles moyennes et 258 grandes parcelles. Nous pouvons remarquer que des parcelles de grandes tailles sont présentes dans la partie sud de notre territoire. Cependant elles sont excentrées et loin des habitations, seules quelques parcelles seront exploitées pour des installations de grandes envergures. L'espace urbain mobilisable sur la totalité du Noyau Urbain de Tours est important. En revanche, dans le centre de notre territoire (entre la Loire et le Cher) il n'existe quasiment pas de foncier répondant à nos critères. Nous ne pourrions donc pas installer de chaufferies en centre ville.

Pour rendre les résultats plus lisibles et afin d'alléger les calculs, nous alimenterons seulement quelques espaces avec les chaufferies bois. Ainsi, cinq parcelles sont sélectionnées de manière à alimenter des tissus urbains différents. Sur chacune de ces parcelles, nous considérerons que des complexes de chaudières de 1, 2 et 5 MW formeront un ensemble d'une puissance totale de 20 MW. Le système d'association de petites chaudières évite d'utiliser une chaudière de grande puissance en sous régime.

Les parcelles sélectionnées pour l'installation des complexes de chaudières



Carte 8 : Les parcelles sélectionnées pour l'installation des complexes de chaudières



Parcelle A1



Parcelle A2



Parcelle A3



Parcelle A4

Visualisation aérienne des 5 parcelles choisies pour l'installation des complexes de chaudières bois



Parcelle A5

Figure 60: Visualisation aérienne des 5 parcelles choisies pour l'installation des complexes de chaudières bois.

La figure 60 montre que les parcelles accueillant les centrales sont localisées dans des zones périurbaines. Elles sont actuellement agricoles mais jouxtent des zones résidentielles. Seule la centrale A2 est située à proximité de zone industrielle et de grands ensembles.

c) Détermination des zones de distribution potentielles

A partir de chacune de ces parcelles, une zone de distribution potentielle est créée en utilisant les outils expliqués précédemment. La quantité de bois nécessaire est composée de 70% de feuillus et de 30% de résineux, à l'image des proportions présentes en Indre-et-Loire. La figure 61 présente les caractéristiques de ces zones.

Chaufferie	Energie distribuée (MWh)	Nombre d'habitants chauffés	Surface habitable chauffée (m ²)	Tonnes de bois nécessaires à l'alimentation
A1	32 166,3	4 838	389 968	13 469
A2	31 327,9	5 141	414 278	13 118
A3	33 088,0	3 825	329 219	13 855
A4	32 497,6	4 155	336 954	13 607
A5	31 536,4	3 842	338 789	13 205
moyenne	32 123,24	4 360	361 842	13 450

Figure 61 : Les caractéristiques des zones de distribution potentielles

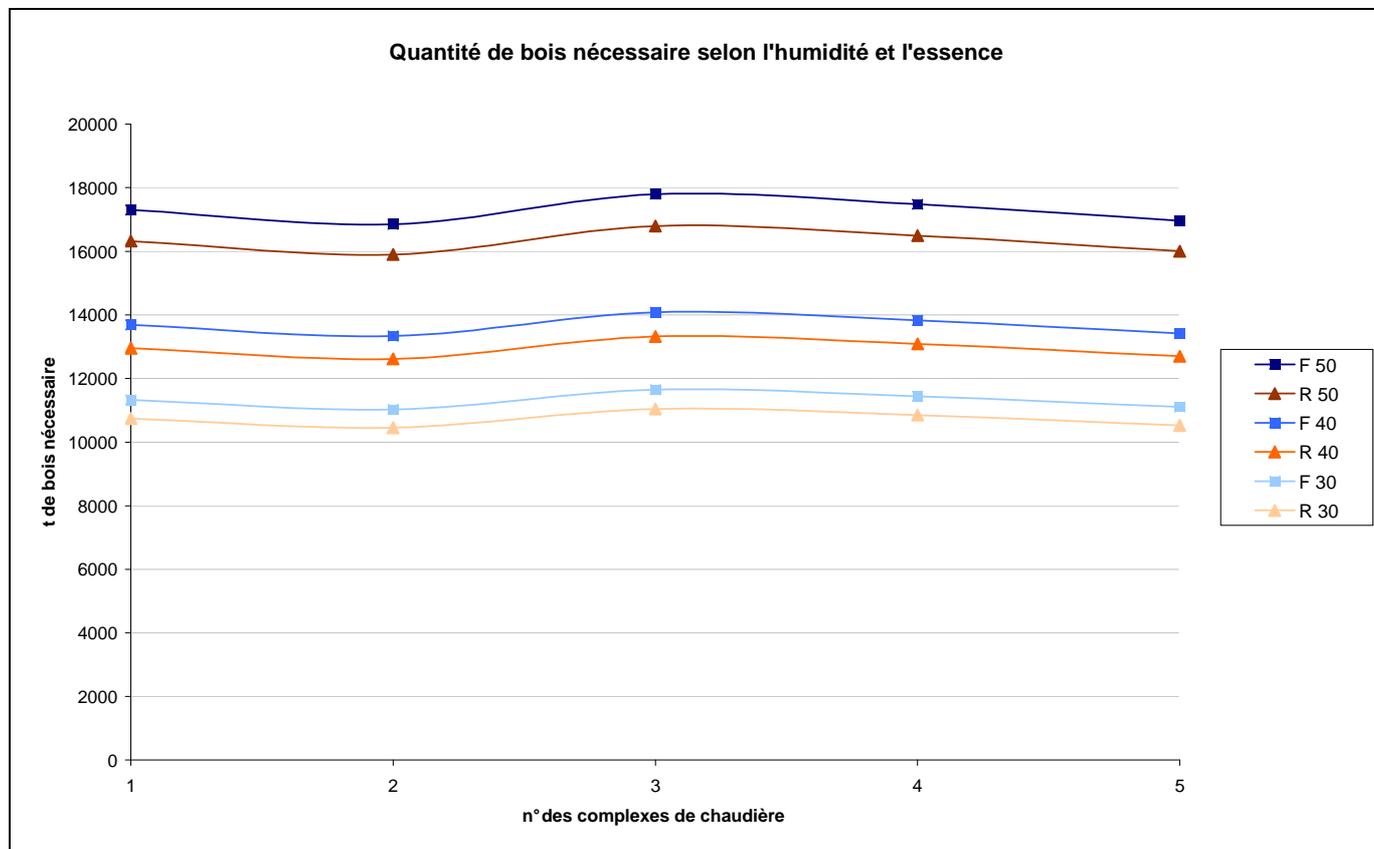
Suite à la création de ces zones de distribution potentielles de l'énergie, visibles sur la carte 9, nous pouvons ressortir des spécificités du tissu urbain alimenté. En effet, les centrales possèdent la même puissance mais les indicateurs des zones de distribution présentent des différences. A1 et A2 se détachent des autres car leur population chauffée est supérieure respectivement de 11 et 17% à la moyenne, de même que leurs surfaces chauffées sont supérieures de 7 et 14%. Elles alimentent en effet des tissus urbains plus denses composés en partie d'habitats collectifs, la zone A2 dessert même des grands ensembles, ce qui explique qu'elle peut chauffer le plus de population et la plus grande surface habitable avec le moins d'énergie et donc le moins de combustible.

Les zones A3, A4 et A5 peuvent alimenter un nombre de population et des surfaces similaires, situées dans la zone périurbaine sud du Noyau Urbain de Tours, elles comprennent des zones pavillonnaires, qui sont peu denses.

La zone la moins pertinente est A3, en effet c'est la zone chauffant le moins d'habitant et le moins de surface alors qu'elle nécessite le plus de tonnes de bois.

Ainsi nous pouvons déjà appréhender l'influence que peut avoir les formes urbaines sur les caractéristiques des réseaux de chaleur qui seront élaborés à partir des zones de distribution potentielles.

La quantité de bois nécessaire relève de paramètres que l'on peut faire varier. Ainsi, à partir des zones de distribution potentielles de chacune des centrales Ai, les quantités de bois nécessaire pour 30%, 40% et 50% d'humidité ont été calculées, en considérant une alimentation avec des résineux (R) et des feuillus (F).

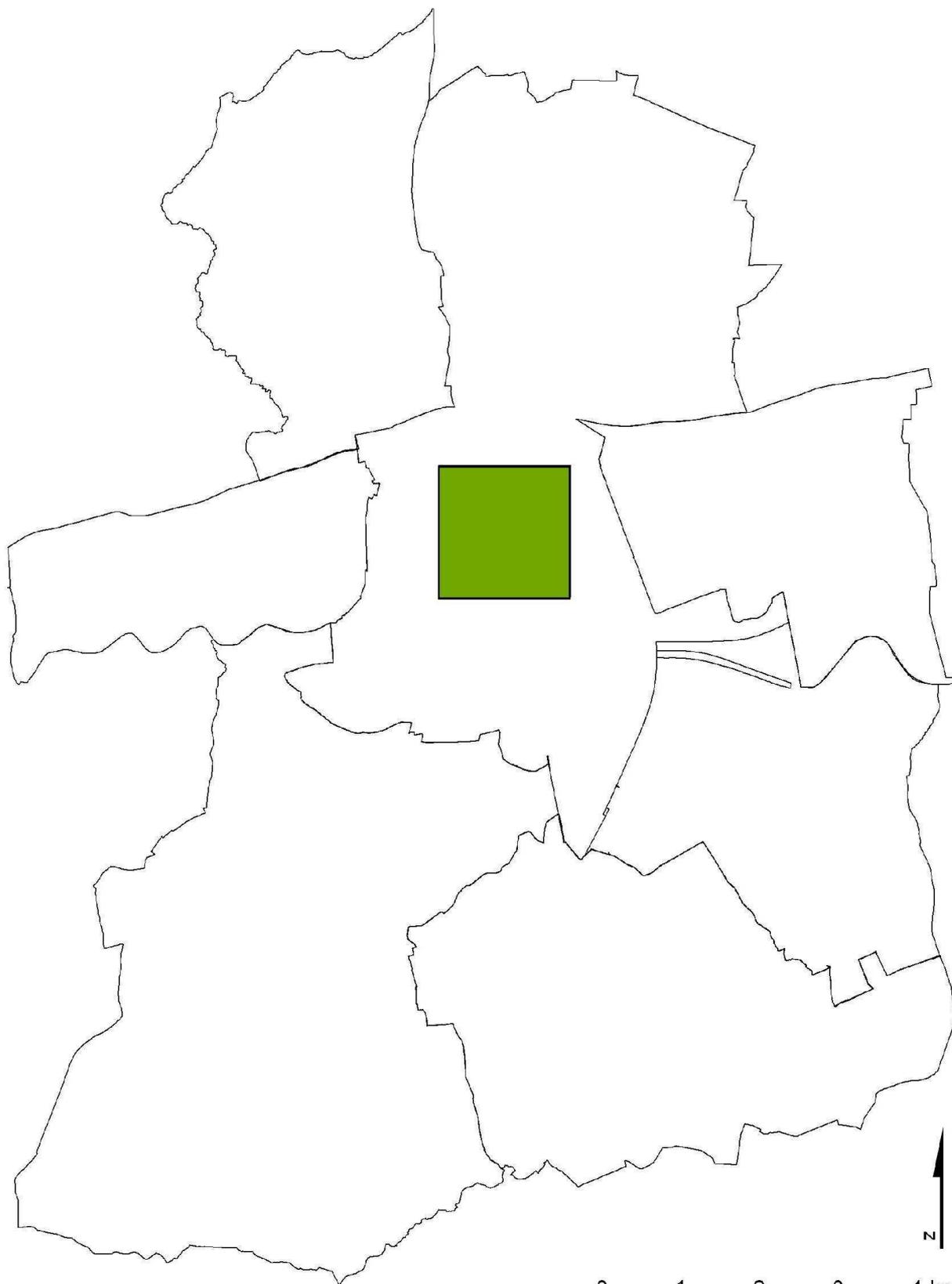


Ce graphique nous montre que la variation d'humidité a plus d'impact sur la variation de la quantité de bois que l'essence. Cependant à une grande échelle, le type feuillu ou résineux peut avoir un impact non négligeable. En effet, pour une humidité fixe de 40%, passer d'une alimentation en feuillus à une alimentation en résineux permet d'économiser en moyenne sur les cinq complexes, 735 tonnes de bois par an, ce qui équivaut à une diminution de 5,4%.

En considérant des proportions d'essence semblables à celle de l'Indre-et-Loire (70% de feuillus et 30% de résineux) avec 40% d'humidité, nous obtenons pour le complexe A4, une quantité de bois de 13 600 tonnes. Cela équivaut à 57 ha d'une forêt de 80 ans.

Pour l'ensemble des cinq complexes, l'alimentation en bois est de 67 000 tonnes, cela correspond à une forêt de 80 ans d'une superficie de 280 ha. Cette surface est représentée sur la carte suivante.

Représentation de la surface boisée nécessaire pour alimenter les 5 chaufferies bois

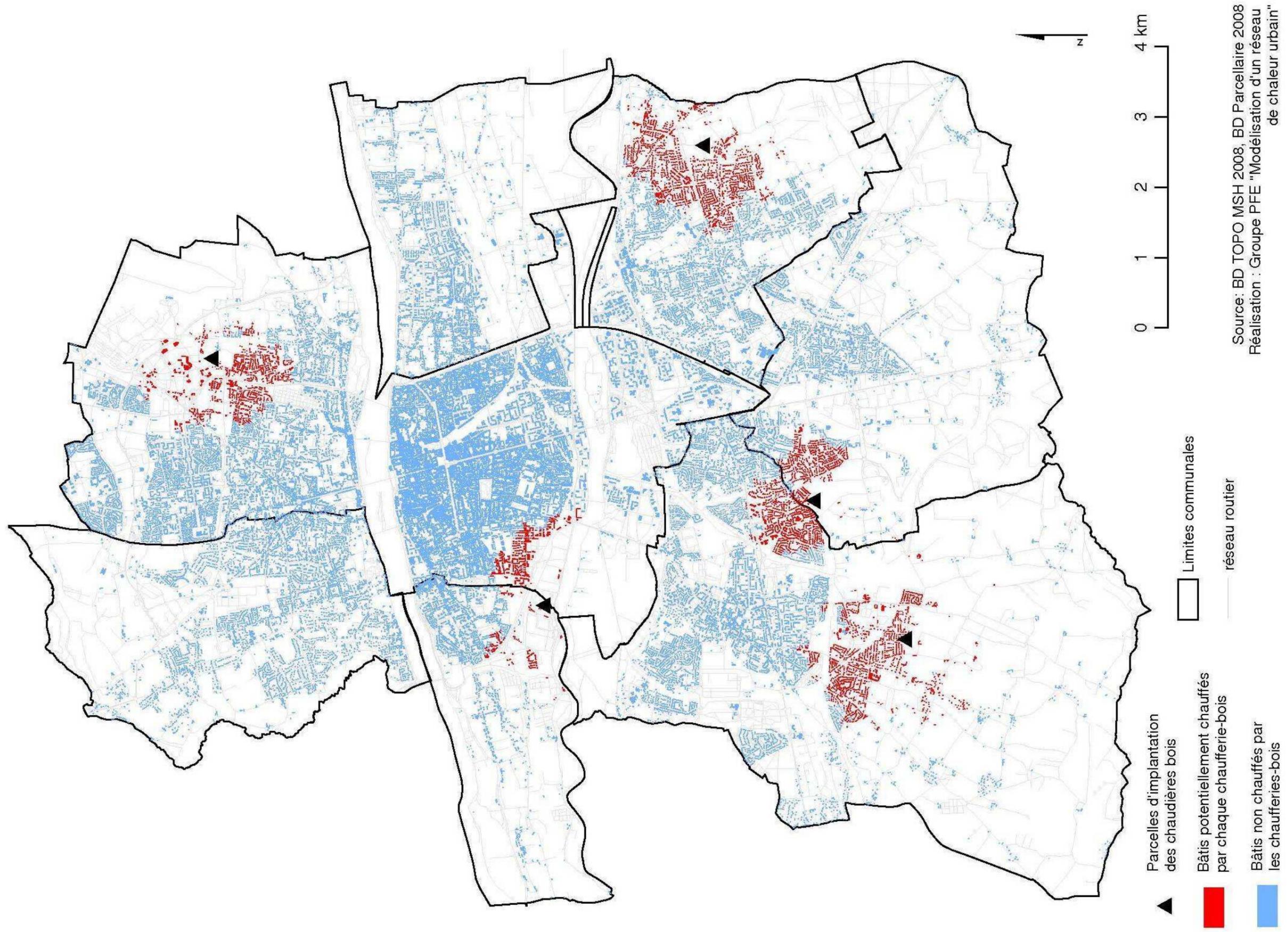


 limites communales

 surface boisée nécessaire

Source: BD TOPO MSH 2008, BD Parcellaire 2008
Réalisation : Groupe PFE "Modélisation d'un réseau
de chaleur urbain"

Espaces urbains potentiellement alimentés en énergie par les chaufferies bois (CAS 5 CHAUFFERIES BOIS)



Carte 9 : Espaces urbains potentiellement alimentés en énergie par les chaufferies bois

1.5 L'offre méthanisation

a) Détermination du gisement en déchets du Noyau Urbain de Tours

Dans cette partie, nous allons appliquer la méthode décrite précédemment. Le point de départ est d'estimer le gisement de déchets pouvant être méthanisé. Pour estimer ce gisement différentes données ont été recoupées. D'un côté une plaquette fournie par la communauté d'agglomération de Tours visible ci-dessous et de l'autre un tableau contenant la répartition des déchets selon leur catégorie. Ce second tableau provient de l'ADEME.



Figure 62 : Composition des ordures ménagères

	en %	kg/hab/an
Déchets putrescibles	28,8 %	125
Papier carton	25,3 %	109,8
Plastiques	11,1 %	48,2
Verre	13,1 %	56,8
Métaux	4,1 %	17,8
Autres	17,6 %	n.s.
Total	100 %	434

Pour le cas de l'agglomération tourangelle, le total par habitant et par an, en enlevant le poste déchèterie qui n'est pas pris en compte dans le tableau de l'ADEME, est de 428 kg. Or on sait que la partie méthanisable des déchets est constituée des déchets putrescibles. Ainsi, dans le cas de Tours le total méthanisable par an et par habitant est de 123,3 kg ($0,288 \times 428$). De plus chaque année 60 kg/hab de déchets verts sont ramassés dans les différents espaces verts publics du noyau urbain (source Ademe). Le Noyau Urbain de Tours est composé de 238 397 habitants.

Le gisement total pour la méthanisation des déchets ménagers est donc de :

43698,17 tonnes par an ($((123,3+60) \times 238\ 397)$)
--

b) Choix des scénarios pour la méthanisation

C'est la valeur du gisement en déchets qui détermine les scénarios que l'on peut mettre en place. On décide de mettre en place 3 scénarios :

- Un scénario à 1 usine avec le gisement total G de déchets
- Un scénario à 2 usines avec une quantité de déchets égale à $G/2$ pour chaque usine
- Un scénario à 4 usines avec une quantité de déchets égale à $G/4$ pour chaque usine

On ne met pas en place un scénario à 8 usines, car celui-ci engendrerait un trop grand éparpillement du gisement de déchets. On comparera donc les distances pour récupérer les déchets uniquement sur les trois scénarios choisis.

La surface nécessaire pour implanter les unités de méthanisation va donc varier en fonction des scénarios :

- $32\ 000\text{m}^2$ pour environ 40 000 tonnes/an (usine de Morbach)
- $15\ 000\text{m}^2$ pour environ 20 000 tonnes/an (usine d'Auch)
- $7\ 500\text{m}^2$ pour environ 10 000 tonnes/an (hypothèse)

Des unités de méthanisation traitant environ 10 000 tonnes de déchets par an n'existent pas aujourd'hui, c'est pour cela que l'on fait une hypothèse sur la surface nécessaire pour implanter cette taille d'usine. Cette hypothèse est basée sur les surfaces des deux autres types d'usines listés auparavant.

c) Détermination des espaces urbains pouvant accueillir des unités de méthanisation

La méthode précédemment expliquée dans le rapport a été appliquée au cas de notre territoire d'étude. On obtient alors les parcelles éligibles pour chaque scénario et on peut déterminer les parcelles finalement utilisées. Pour chaque scénario, seul un critère change, il s'agit du critère de surface minimale.

i) Cas du scénario à une unité de méthanisation

La carte 10 visualise les parcelles du Noyau Urbain de Tours répondant aux critères énoncés dans la partie modèle théorique dans le cas d'une seule unité de méthanisation. Toutes les parcelles coloriées en rouge ou en vert sont constructibles, en zone non inondable, ont un accès à un axe routier important, une surface supérieure à 32000m² et sont suffisamment éloignées des habitations. Elles sont donc éligibles. Les parcelles en bleu répondent aux mêmes exigences sauf qu'elles se situent en zone inondable. Rappelons que ces parcelles ne sont pas considérées comme éligibles à cause de la vulnérabilité des méthaniseurs vis-à-vis des inondations. On les visualise afin de montrer que le critère de non inondabilité de la parcelle influence peu sur le nombre de parcelles éligibles.

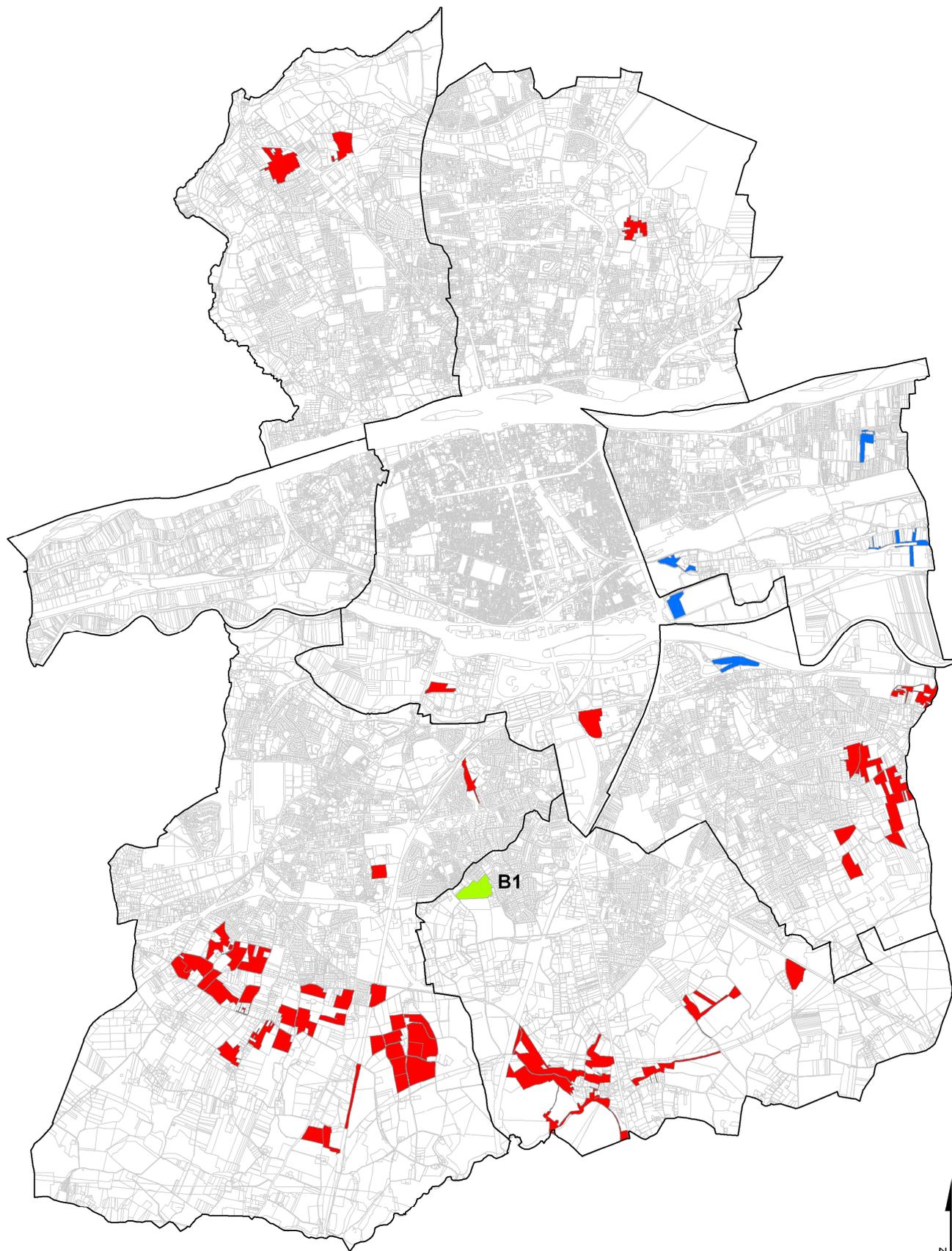
Le choix de la parcelle finale s'est fait en plusieurs étapes. Tout d'abord, on élimine les parcelles ayant une forme inadaptée à l'implantation d'une unité de méthanisation. Ensuite on élimine les parcelles trop éloignées des zones densément urbanisées. Il s'agit des parcelles situées au nord de la Loire, de celles formant l'arc au sud du Noyau Urbain de Tours et de celles situées à l'Est du noyau urbain. Le choix se fait donc sur les quelques parcelles restantes, au nombre de cinq. Parmi celles-ci on élimine les parcelles qui sont en réalité déjà utilisées (visualisation avec Google Earth) comme celle de l'Heure Tranquille aux 2 Lions, celle au sein d'un espace boisé classé (parc de Grandmont) et celle étant en réalité le cimetière de Joué-lès-Tours. On a alors choisi, parmi les deux restantes, de prendre la parcelle en vert (B1) sur la carte 10, celle-ci étant mieux placée d'un point de vue urbain ; non enclavée, proche d'un plus grand nombre de zones urbanisées et forme plus adaptée. La parcelle choisie est visible sur la photo aérienne ci-dessous.



B1 – Surface: 138 397 m²

Figure 63 : Visualisation aérienne de la parcelle de l'usine

Parcelles éligibles pour le scénario 1 usine de méthanisation, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours



■ parcelles de plus de 32 000m² éligibles pour implanter un méthaniseur

□ limites communales

0 1 2 3 4 km

■ parcelles de plus de 32 000m² éligibles pour implanter un méthaniseur, comprises dans le périmètre du PPRi

□ parcelles du Noyau Urbain de Tours

■ parcelles sélectionnées pour implanter un méthaniseur

Source: BD TOPO MSH 2008, BD Parcellaire 2008
Réalisation : Groupe PFE "Modélisation d'un réseau de chaleur urbain"

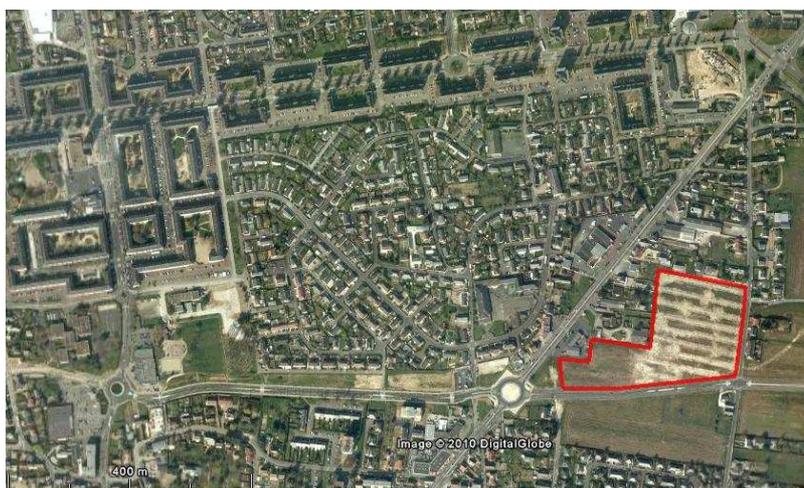
Carte 10 : Parcelles éligibles pour le scénario 1 usine de méthanisation, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours

ii) Cas du scénario à deux unités de méthanisation

La carte 11 visualise les parcelles du Noyau Urbain de Tours répondant aux critères énoncés dans la partie modèle théorique dans le cas de deux unités de méthanisation. Toutes les parcelles coloriées en rouge ou en vert sont constructibles, en zone non inondable, ont un accès à un axe routier important, une surface supérieure à 15000m² et sont suffisamment éloignées des habitations. Elles sont donc éligibles.

Pour le choix des parcelles finales, on applique le même procédé que pour une seule unité en ajoutant un seul autre critère de sélection. Il s'agit de répartir intelligemment les deux unités au sein du Noyau Urbain en ne les mettant pas l'une à côté de l'autre. Cette façon de répartir les parcelles finales est primordiale pour la constitution des zones de collecte, ce qu'on verra par la suite.

On obtient alors au final les deux parcelles en vert sur la carte 11. Ces deux parcelles sont visibles sur les photos aériennes ci-dessous. La parcelle C1 permet de mettre en place un méthaniseur à proximité de grands ensembles et la parcelle C2 se situe au sein d'un quartier à forte tendance pavillonnaire. Ces localisations permettront par la suite de mettre en évidence l'influence du tissu urbain dans l'établissement de réseaux de chaleur.



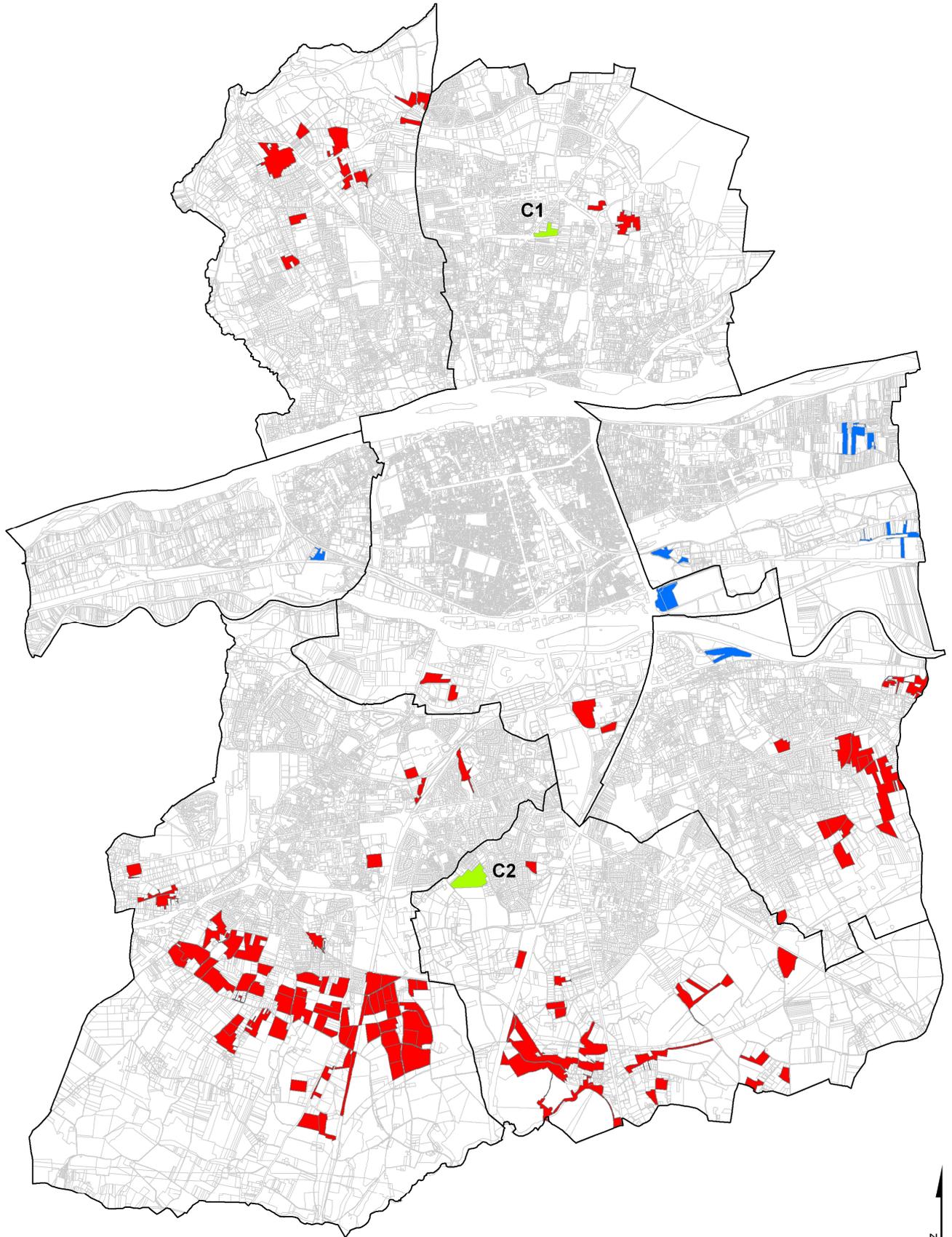
C1
Surface :
28 702 m²



C2
Surface :
138 397 m²

Figure 64 : Visualisation aérienne des 2 parcelles pour les 2 usines

Parcelles éligibles pour le scénario 2 usines de méthanisation, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours



- parcelles de plus de 15 000m² éligibles pour implanter un méthaniseur
- limites communales
- parcelles de plus de 15 000m² éligibles pour implanter un méthaniseur, comprises dans le périmètre du PPRi
- parcelles du Noyau Urbain de Tours
- parcelles sélectionnées pour implanter un méthaniseur

0 1 2 3 4 km

Source: BD TOPO MSH 2008, BD Parcellaire 2008
 Réalisation : Groupe PFE "Modélisation d'un réseau de chaleur urbain"

Carte 11 : Parcelles éligibles pour le scénario 2 usines de méthanisation, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours

iii) Cas du scénario à quatre unités de méthanisation

La carte 12 visualise les parcelles du noyau urbain de Tours répondant aux critères énoncés dans la partie modèle théorique dans le cas de quatre unités de méthanisation. Toutes les parcelles coloriées en rouge ou en vert sont constructibles, en zone non inondable, ont un accès à un axe routier important, une surface supérieure à 7500m² et sont suffisamment éloignées des habitations. Elles sont donc éligibles.

Pour le choix des parcelles finales, on applique le même procédé que pour une ou deux unités de méthanisation et on répartit également intelligemment les quatre unités au sein du noyau urbain en ne les mettant pas à proximité les unes des autres. On obtient alors au final les quatre parcelles en vert sur la carte 12. Ces quatre parcelles sont visibles sur les photos aériennes ci-dessous. On retrouve trois parcelles (parcelles D1, D3 et D4) à proximité de quartiers pavillonnaires et une à proximité de grands ensembles (D2).



D1-Surface : 26 136 m²



D2-Surface : 28 702 m²



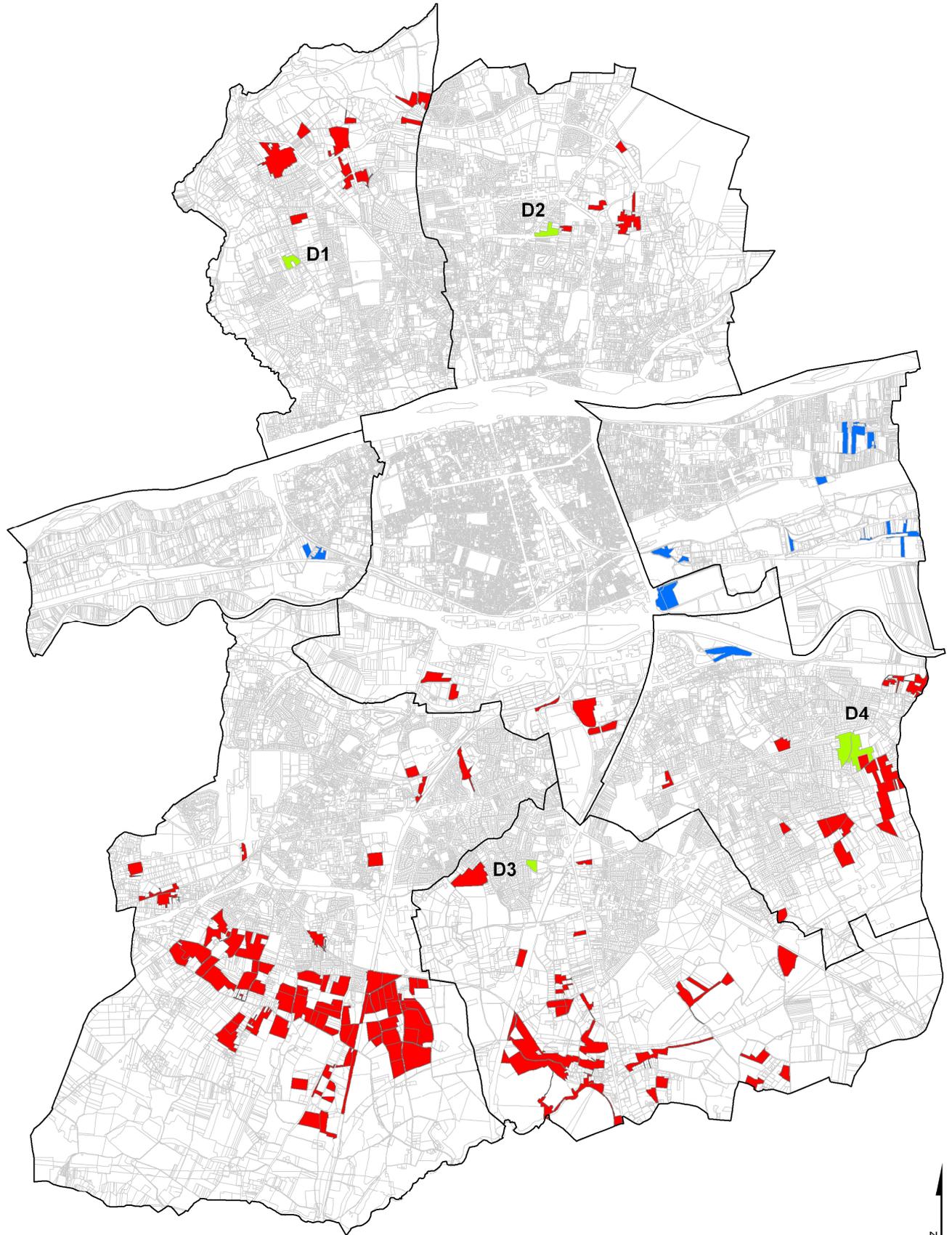
D3-Surface : 15 395 m²



D4-Surface : 131 620 m²

Figure 65 : Visualisation aérienne des 4 parcelles pour les 4 usines

Parcelles éligibles pour le scénario 4 usines de méthanisation, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours



■ parcelles de plus de 7 500m² éligibles pour implanter un méthaniseur

□ limites communales

0 1 2 3 4 km

■ parcelles de plus de 7 500m² éligibles pour implanter un méthaniseur, comprises dans le périmètre du PPRi

□ parcelles du Noyau Urbain de Tours

■ parcelles sélectionnées pour implanter un méthaniseur

Source: BD TOPO MSH 2008, BD Parcellaire 2008
Réalisation : Groupe PFE "Modélisation d'un réseau de chaleur urbain"

iv) Bilan de l'insertion des unités de méthanisation au sein du Noyau Urbain de Tours

La détermination des espaces urbains pouvant accueillir des unités de méthanisation au sein du Noyau Urbain de Tours apporte plusieurs enseignements. Tout d'abord, la contrainte de surface minimale engendre l'impossibilité de mettre en place des unités dans le centre de Tours, et ce quel que soit le scénario. Ce phénomène est amplifié par le fait que le centre de Tours se situe en zone inondable et qu'on ne peut pas implanter d'unités de méthanisation dans des zones soumises au risque d'inondation. Quel que soit les scénarios, la très large majorité des parcelles éligibles se situe donc en milieu périurbain, souvent à la limite de l'urbanisation actuelle. Lorsque l'on passe de une à plusieurs unités de méthanisation, on utilise pour les parcelles finales des parcelles qu'on avait écartées pour le scénario à une unité. Cela s'explique par la répartition homogène des unités de méthanisation sur l'ensemble de Noyau Urbain dans le scénario à quatre unités. Il faut noter également que le nombre de parcelles éligibles augmente peu lorsque l'on passe d'une surface minimale de 15 000m² à 7 500m². Le Noyau Urbain de Tours est donc pauvre en parcelles libres comprises entre 7 500 m² et 15 000 m² ce qui nous contraint à utiliser des parcelles de grande taille pour le scénario à quatre unités de méthanisation.

Ce que l'on observe dans le cas du Noyau Urbain de Tours se reproduira probablement dans le cas d'autres espaces urbains ayant la même typologie urbaine. Des différences apparaîtront peut-être si la typologie change, absence de zones inondables par exemple.

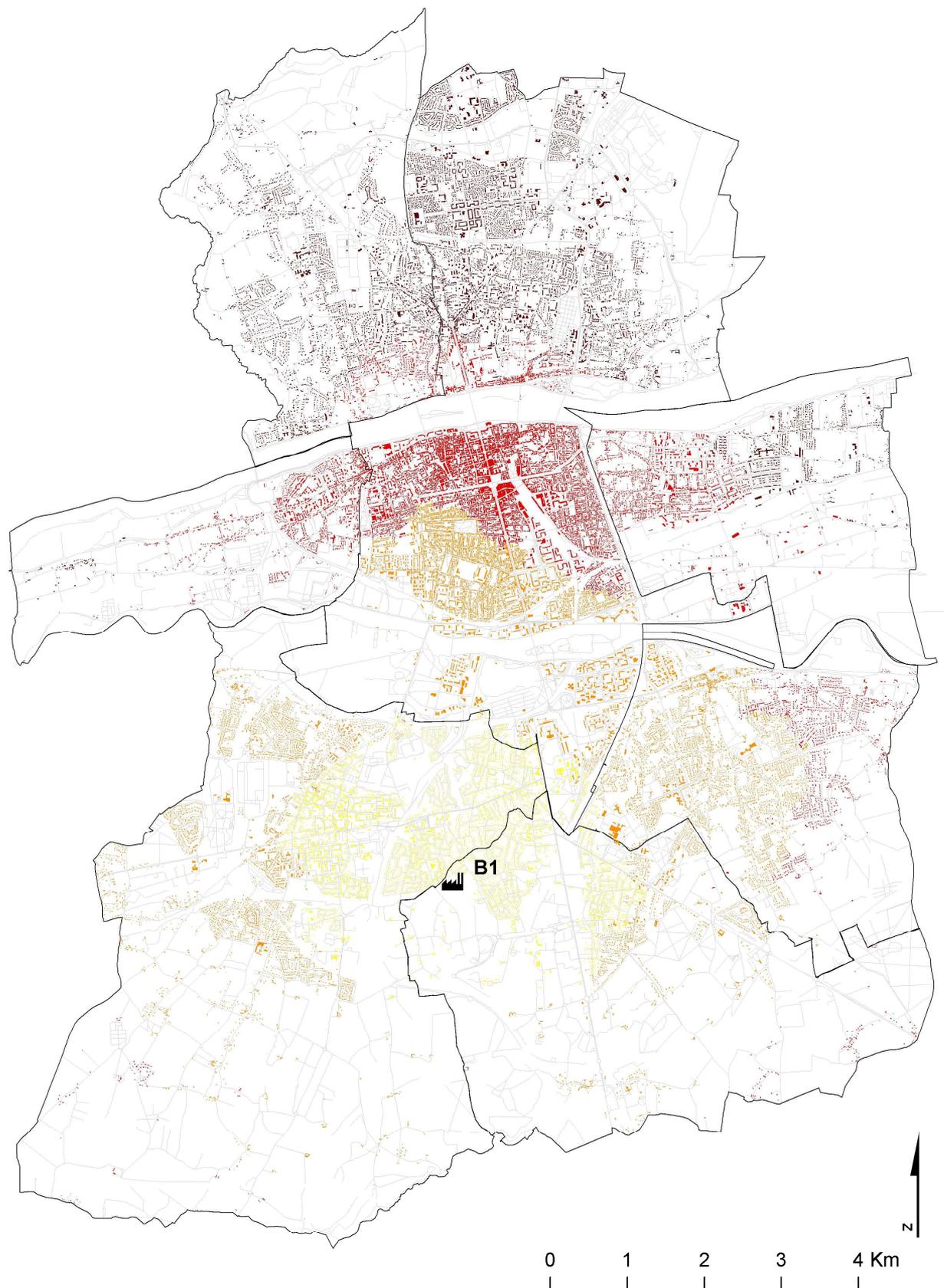
d) Détermination du scénario optimal pour collecter les déchets

i) Description et analyse des zones de collecte pour chaque scénario

On détermine les zones de collectes pour chaque unité de méthanisation de chaque scénario. Pour le scénario à une usine, la zone de collecte englobe l'ensemble du Noyau Urbain de Tours. Pour le scénario à deux unités, le gisement de déchets du noyau urbain est séparé en deux zones de collecte de même quantité de déchets. Enfin dans le cas de quatre unités, on sépare le gisement de déchets en quatre zones de collecte ayant le même tonnage de déchets.

Les trois cartes qui suivent illustrent les zones de collecte pour les différents scénarios.

Zone de collecte du méthaniseur avec des isodistances (cas d'une usine)



Distance de la zone de collecte au méthaniseur
en Km

0 - 3
3 - 6

6-9
9 et +



méthaniseur



routes principales

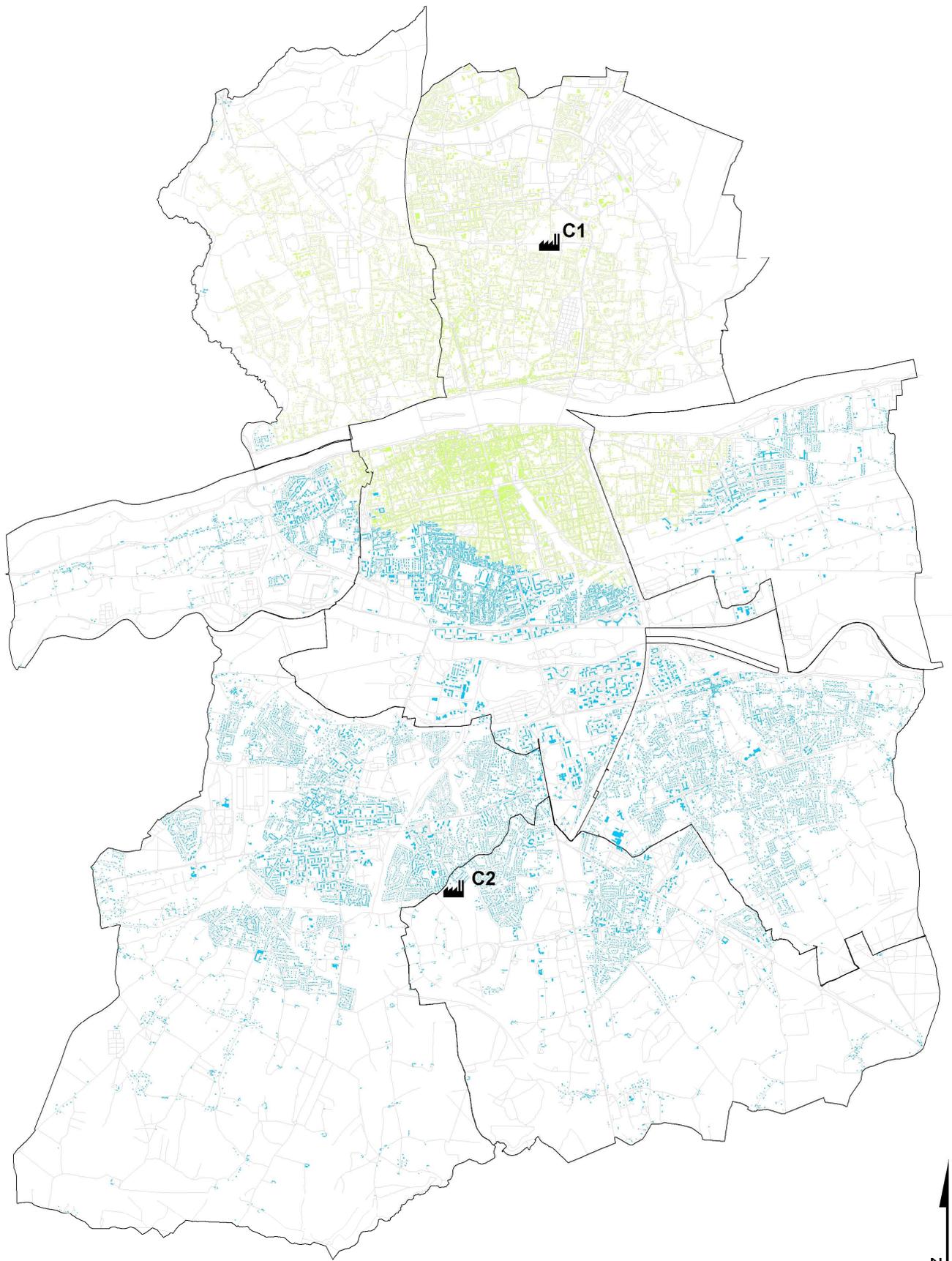


limites communales

Source : BD Topo 2008

Réalisation : Groupe PFE 'Modélisation d'un réseau de chaleur urbain'

Zones de collecte des méthaniseurs (cas de 2 usines)



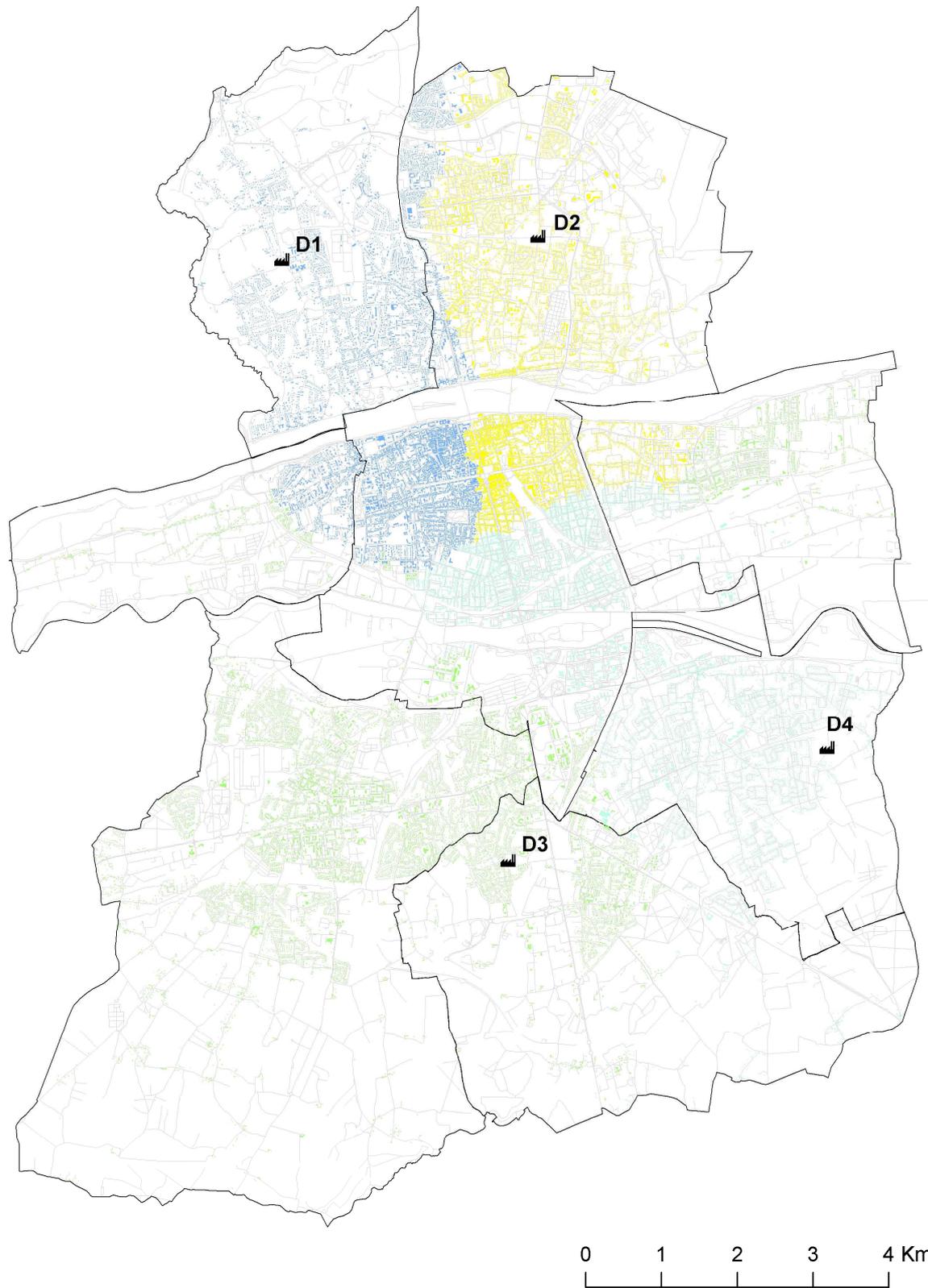
-  zone de collecte de C1
-  zone de collecte de C2
-  méthaniseur
-  routes principales
-  limites communales

0 1 2 3 4 Km

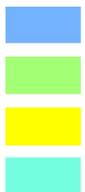
Source : BD Topo 2008
Réalisation : Groupe PFE 'Modélisation d'un réseau de chaleur urbain'

Carte 14 : Zones de collecte des méthaniseurs (cas de 2 usines)

Zones de collecte des méthaniseurs (cas 4 usines)



zones de collecte



 méthaniseur

 limites communales

 routes principales

Source : BD Topo 2008

Réalisation : Groupe PFE 'Modélisation d'un réseau de chaleur urbain'

- *Cas d'une seule unité de méthanisation :*

La zone de collecte recouvre donc l'ensemble du noyau urbain de Tours. La carte sépare le bâti en zones fonction de la distance entre l'unité de méthanisation et chaque bâtiment. La distance utilisée est la distance par le réseau routier. Le tableau ci-dessous fournit les pourcentages de bâtiments compris dans différentes zones. Ces zones sont définies par des critères de distance entre les bâtiments et le méthaniseur.

Distance entre les bâtiments et l'unité de méthanisation	% bâtiments
de 0 à 3 km	12,0
de 0 à 6 km	41,8
de 0 à 9 km	76,4
0 km et +	100,0
0 km et +	100,0
3km et +	88,0
6 km et +	58,2
9 km et +	23,6

Figure 66 : Répartition des bâtiments en fonction de la distance à l'usine

Ce tableau met en évidence l'éloignement existant entre l'unité de méthanisation et le centre de Tours. En effet, 58,2 % des bâtiments sont à une distance supérieure à 6km de l'usine et uniquement 12% des bâtiments sont à moins de 3 km du méthaniseur. Ainsi, si un méthaniseur avait pu être implanté près du centre de Tours le pourcentage de bâtiments situés à moins de 3 km serait bien plus important. Par conséquent, l'impossibilité de mettre en place un méthaniseur à proximité du centre entraîne une augmentation des distances à parcourir par les camions pour récupérer les déchets et entraîne inévitablement une augmentation des émissions de CO₂ dues aux transports de déchets.

- *Cas de deux unités de méthanisation*

Le gisement de déchets du Noyau Urbain est donc séparé en deux zones de collecte de même quantité de déchets. On remarque une différence importante concernant la surface des zones de collecte des deux unités. En effet, bien que les zones renferment les mêmes quantités de déchets, la zone de collecte située au Sud (C2) est bien plus étendue que la zone de collecte du méthaniseur localisé au Nord (C1). Cela met en évidence le fait que le tissu urbain soit plus dense au Nord du Noyau Urbain.

- *Cas de quatre unités de méthanisation*

Le gisement de déchets est ainsi séparé en quatre zones de collecte ayant le même tonnage de déchets. La carte met à nouveau en évidence les différences de densité du tissu urbain. Ainsi les zones de collecte de déchets des méthaniseurs situés au Sud (D3 et D4) sont plus étendues ce qui souligne la plus faible densité du tissu urbain au Sud du Noyau. De même, on remarque que la zone de collecte de l'usine D3 est plus étendue que celle de l'usine situé D4. Le tissu urbain est donc plus dense au Sud-est qu'au Sud-ouest. On remarque aussi que la zone de collecte de déchets de l'usine D3 est coupée en deux morceaux. Cela s'explique par l'architecture du programme créant ces zones.

ii) Détermination du scénario minimisant les déplacements pour collecter les déchets

La constitution de ces zones de collecte de déchets pour différents scénarios a pour objectif de déterminer quel scénario parmi les trois présentés est optimal du point de vue de la distance parcourue afin de collecter tous les déchets. Il s'agit par conséquent de déterminer le scénario qui émettra le moins de CO₂ dû aux déplacements des camions de collecte.

Le graphique ci-dessous représente l'évolution des distances cumulées pour récupérer tous les déchets en fonction du nombre d'usines, c'est-à-dire en fonction des trois scénarios décrits précédemment.

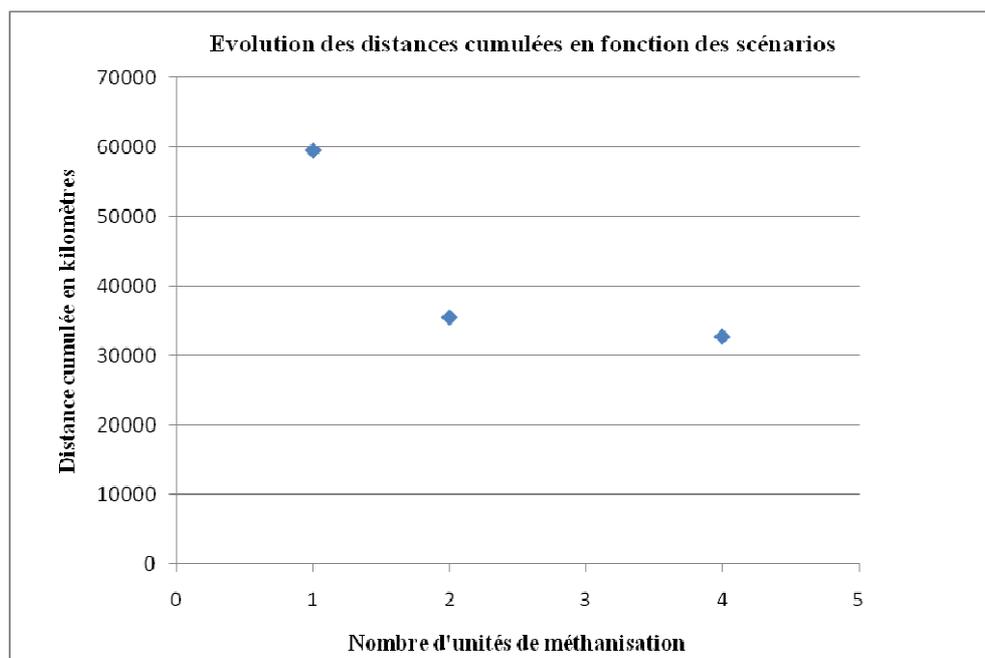


Figure 67 : Evolution des distances cumulées en fonction des scénarios

Le graphique permet d'affirmer que le scénario à quatre usines constitue le scénario minimisant les distances pour récupérer l'ensemble des déchets. Il s'agira donc du scénario qui émettra le moins de CO₂ lors de la collecte des déchets par les camions. Les distances à parcourir sont deux fois plus faibles dans le cas de quatre usines que dans le cas d'une seule usine. La diminution est cependant plus forte lorsque l'on passe de une à deux usines que lorsque l'on passe de deux à quatre usines. Ainsi, d'un point de vue environnemental il paraît plus judicieux de mettre en place deux usines qui se séparent le gisement de déchets que d'implanter une seule usine qui collecte tous les déchets de l'espace urbain.

La diminution des distances à parcourir étant faible entre les scénarios à deux et quatre usines, le passage de deux à quatre usines paraît peu pertinent.

Ce que l'on observe dans le cas du Noyau Urbain de Tours, se reproduira probablement dans le cas d'autres espaces urbains. Cela a été prouvé mathématiquement dans d'autres études.

e) Détermination des zones de distribution de chaleur potentielles

Connaissant les gisements en déchets de chaque usine pour chaque scénario, il est alors possible de déterminer les zones où le bâti pourra être chauffé par le biais de chaleur produite par la méthanisation.

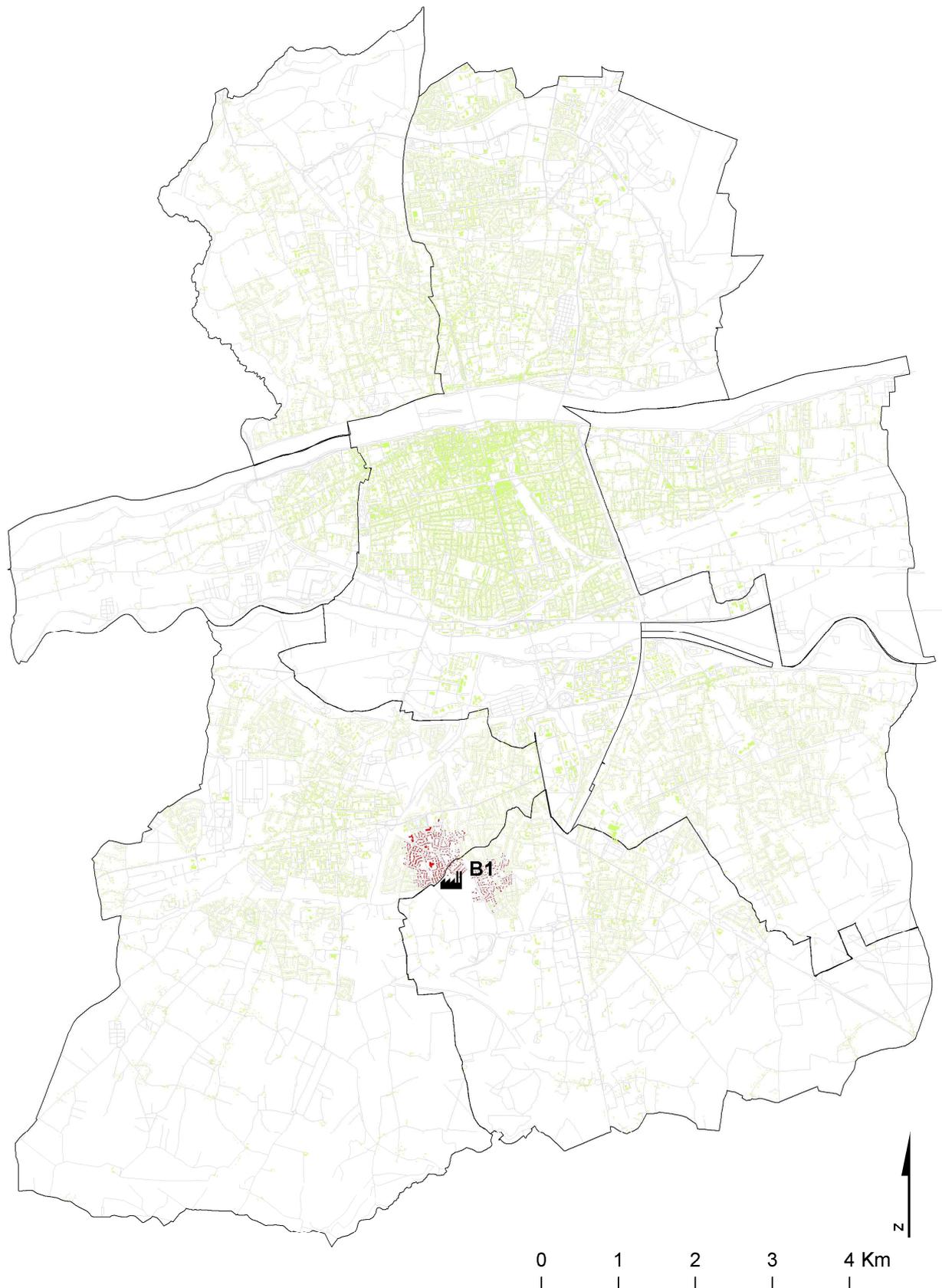
Comme on l'a vu précédemment, la quantité de chaleur Q produite par la méthanisation est définie par

$$Q = G \times \text{Chaleur produite par tonne de déchets}$$

Ainsi, au niveau du Noyau Urbain de Tours le gisement de 43698,17 tonnes de déchets permet de produire 19 664,18 MWh par an de chaleur pouvant servir à chauffer les bâtiments. La production de chaleur est alors soit totalement distribuée par une seule unité de méthanisation, soit divisée en deux ou quatre et par conséquent distribuée par deux ou quatre unités.

Les zones de chaleur visualisées sur les cartes 16, 17 et 18 qui suivent ne prennent pas en compte les pertes de chaleur dues à l'éloignement entre une partie du bâti à chauffer et la chaufferie de l'unité de méthanisation. Ces zones de distribution ont pour objectif d'illustrer le potentiel de la méthanisation afin de répondre à des besoins en chauffage. On évaluera donc le nombre d'habitants ainsi que la surface habitable pouvant être chauffés. **Il ne s'agit pas de réseaux de chaleur.**

Zone de collecte du méthaniseur et zone de distribution potentielle (cas d'une usine)

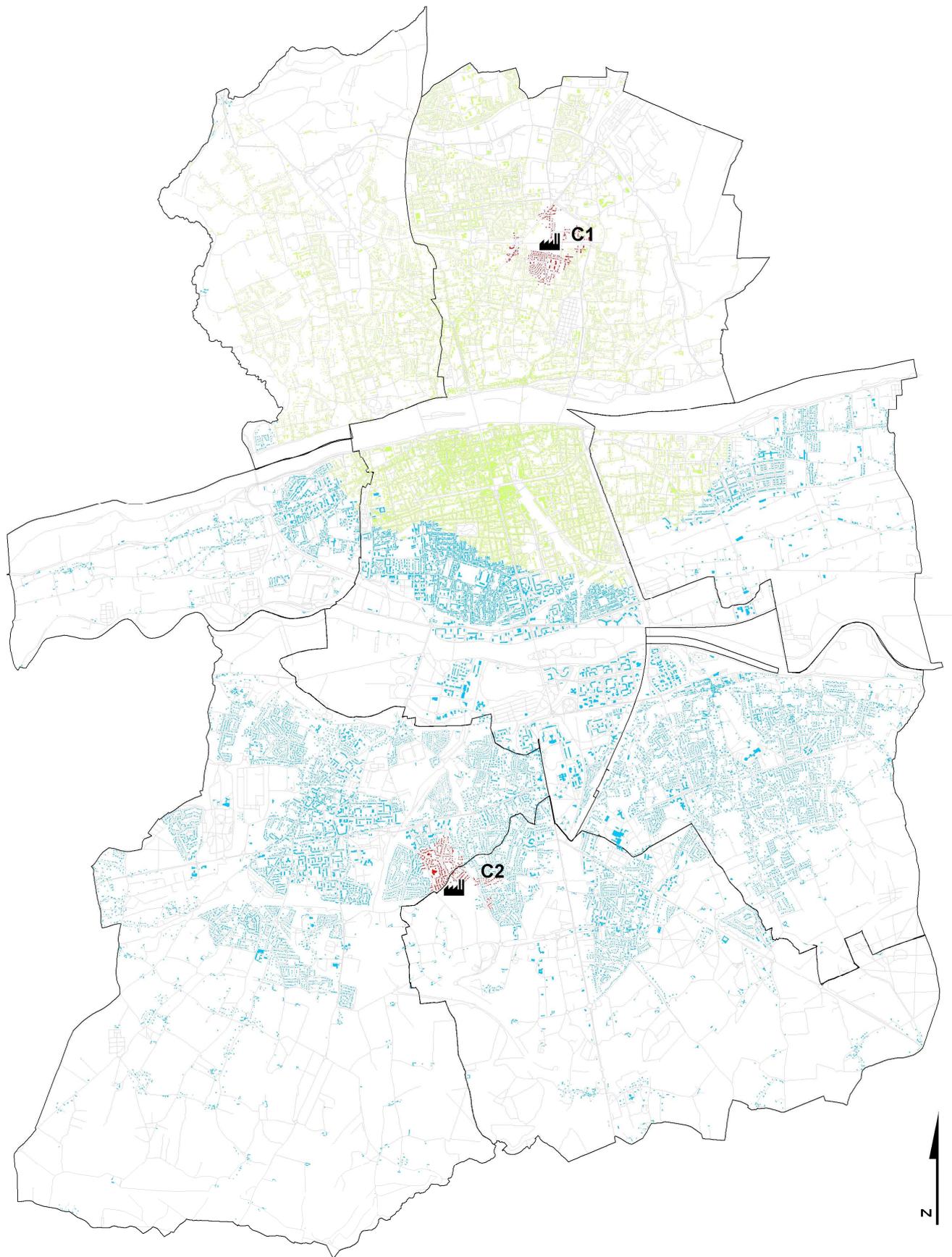


-  zone de distribution potentielle de l'énergie
-  zone de collecte
-  méthaniseur
-  routes principales
-  limites communales

Source : BD Topo 2008
Réalisation : Groupe PFE 'Modélisation d'un réseau de chaleur urbain'

Carte 16 : Zone de collecte du méthaniseur et zone de distribution potentielle (cas d'une usine)

Zones de collecte des méthaniseurs et zones de distribution potentielles de l'énergie (cas de 2 usines)



-  zone de collecte de C1
-  zone de collecte de C2
-  zone de distribution
-  méthaniseur
-  routes principales
-  limites communales

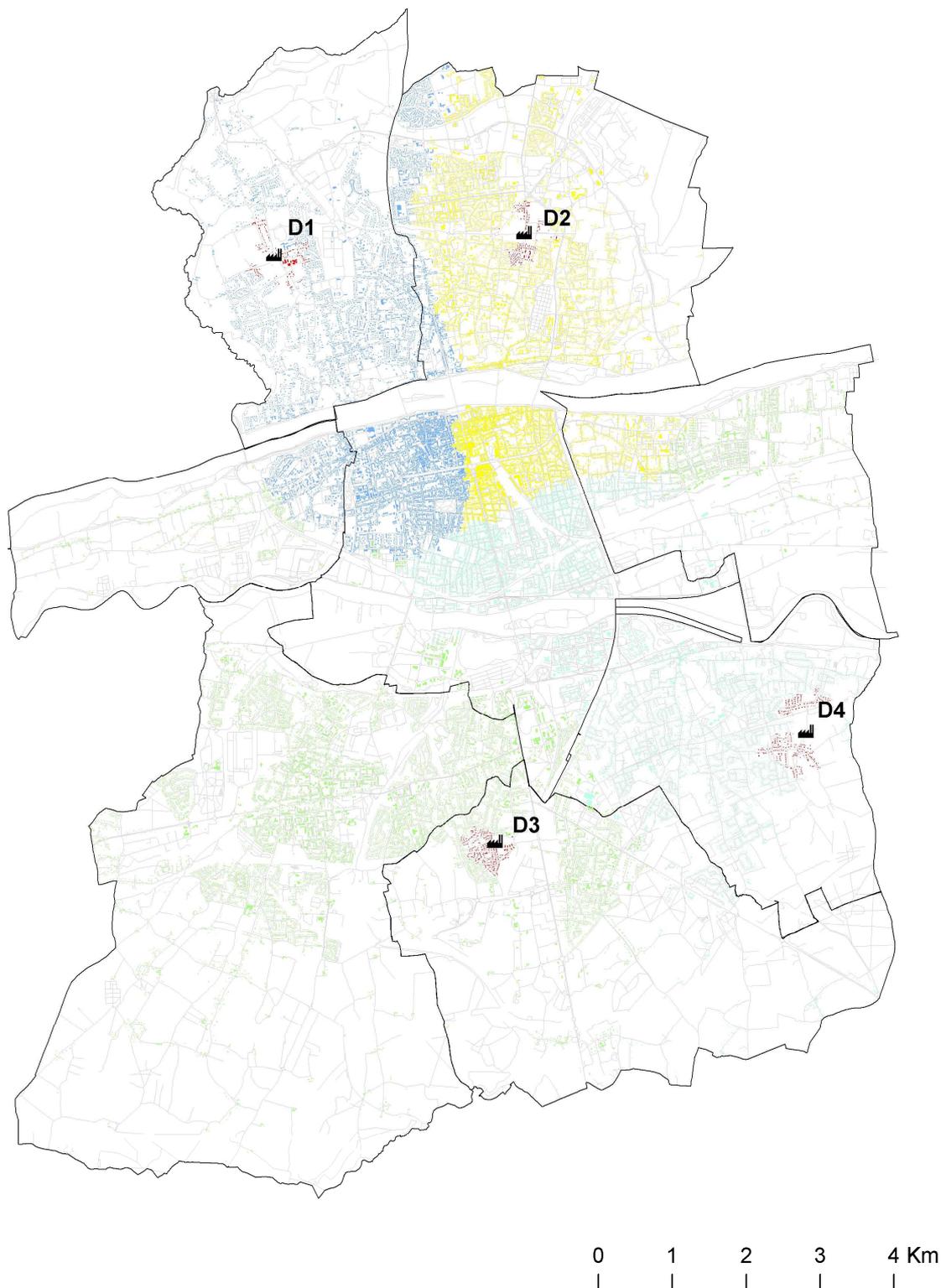
0 1 2 3 4 Km



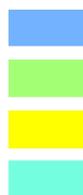
Source : BD Topo 2008
Réalisation : Groupe BEE 'Modélisation d'un réseau de chaleur urbain'

Carte 17 : Zones de collecte des méthaniseurs et zones de distribution potentielles de l'énergie (cas de 2 usines)

Zones de collecte des méthaniseurs et zones de distribution potentielles de l'énergie (cas 4 usines)



zones de collecte



zone de distribution

méthaniseur

limites communales

routes principales

Source : BD Topo 2008

Réalisation : Groupe PFE 'Modélisation d'un réseau de chaleur urbain'

Scénario	Unité de méthanisation	Chaleur distribuée(en MWh)	Nombre d'habitants	Surface habitable chauffée (en m ²)
1 usine	B1	19650,42	2313	188317
2 usines	C1	9798,82	922	87255
	C2	9826,43	1106	89399
4 usines	D1	4909,84	559	57830
	D2	4914,57	467	44576
	D3	4887,63	519	49668
	D4	4906,53	663	52153

Figure 68 : Caractéristiques des zones de distribution potentielles de chaleur pour la méthanisation

Tout d'abord on remarque que la chaleur distribuée par B1 est légèrement inférieure au total produit par l'usine puisque mettre un bâtiment supplémentaire à la zone de distribution surpasserait la production de l'usine. On observe la même chose pour les autres scénarios.

On remarque également que les zones de distribution potentielles sont nettement plus petites que les zones de collecte de déchets associées. On se rend alors compte de la proportion d'une telle technologie à chauffer les bâtiments d'un milieu urbain. La collecte de déchets putrescibles de plus de 238 000 habitants permet de chauffer 2 313 habitants dans le cas du Noyau Urbain de Tours.

Les résultats du scénario à quatre usines soulignent des faits intéressants. On remarque qu'à chaleur distribuée quasiment égale, la surface habitable chauffée varie nettement. Cela s'explique par l'âge du bâti des zones de distribution potentielles mais aussi par la typologie du bâti de ces zones (grands ensembles ou lotissements). Par exemple, la surface bâtie chauffée par D4 est nettement supérieure à celle chauffée par D2. En effet, le bâti contenu dans la zone potentielle de chauffage de D4 est nettement plus récent en termes d'âge de construction que le bâti présent dans la zone de D2. La typologie urbaine n'est pas différente dans ces deux cas car les deux zones de distribution couvrent des lotissements. La zone de distribution D2 recouvre des lotissements et ne s'est pas étendue jusqu'aux grands ensembles à proximité. Cet exemple met en évidence la forte corrélation entre âge du bâti et consommation d'énergie. On peut faire la même remarque entre D1 et D2.

Quel que soit le scénario, la méthanisation des déchets pris en compte dans notre étude permet de répondre à 0,98% des besoins en chauffage du Noyau Urbain de Tours.

Ce chiffre peut paraître faible mais ce sont des énergies fossiles utilisées en moins chaque année. Ce chiffre serait plus important si on avait pris en compte les déchets provenant des industries agro-alimentaires et les boues de stations d'épuration.

1.6 L'offre eaux usées

a) Détermination du nombre de réservoirs à implanter

Le nombre de réservoirs dimensionnés à 45 litres par seconde en sortie est défini par :

$$N = \frac{\text{Nombre d'habitants} \times \text{Production journalière d'eaux usées par habitant}}{\text{Nombre de secondes dans une journée} \times \text{Débit en sortie de réservoir}}$$

Dans le cas du Noyau Urbain de Tours, il faut implanter 9 réservoirs (partie entière du résultat trouvé) et donc trouver 9 parcelles où l'on pourra installer des unités de récupération de chaleur (réservoir, canalisation avec échangeur et chaufferie).

b) Détermination des espaces urbains pouvant accueillir des unités de récupération de chaleur des eaux usées

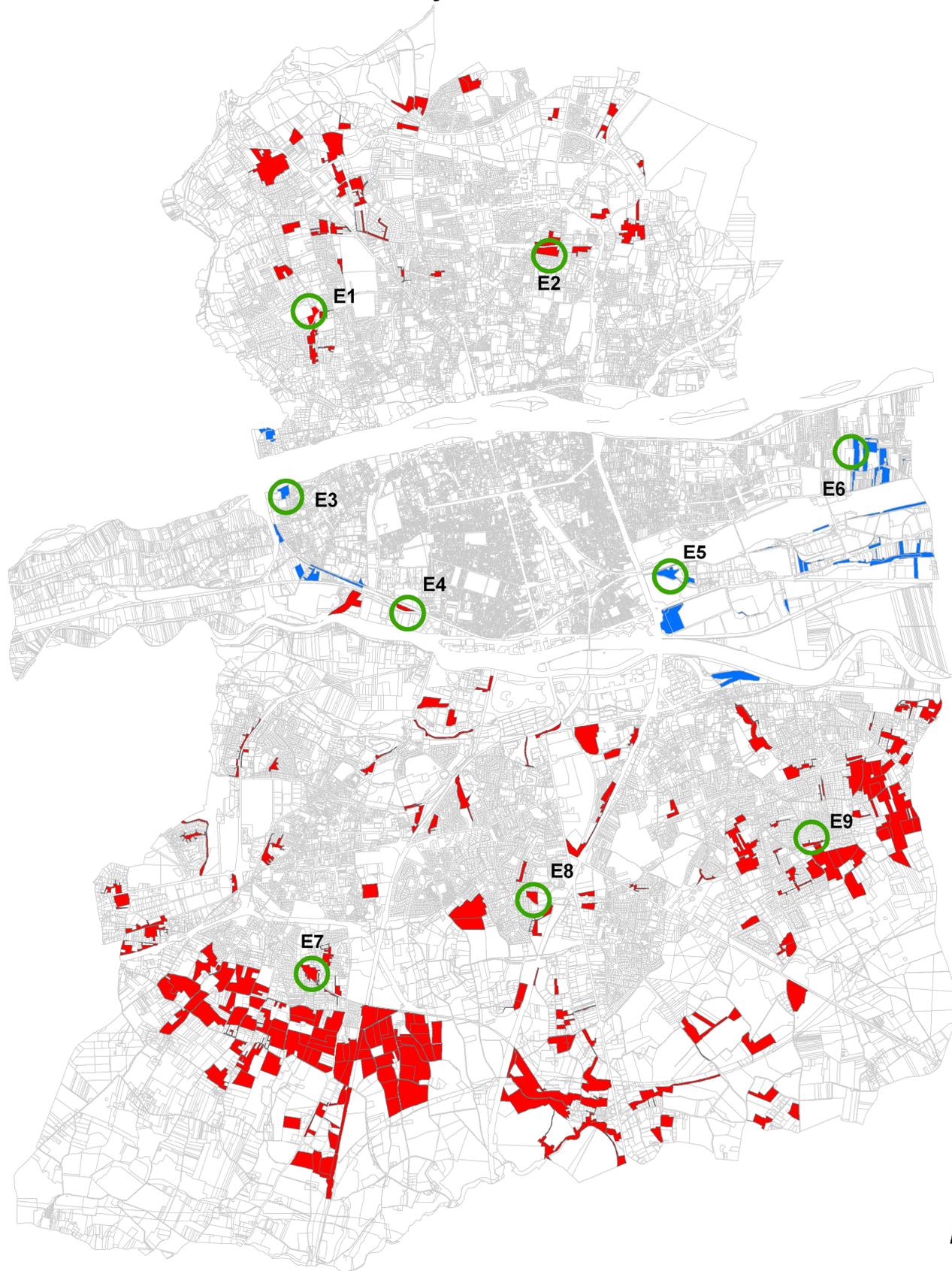
La méthode précédemment expliquée dans le rapport a été appliquée au cas de notre territoire d'étude. On obtient alors les parcelles éligibles pour implanter les unités et on peut ainsi déterminer les parcelles finalement utilisées.

La carte 19 visualise les parcelles du Noyau Urbain de Tours répondant aux critères énoncés dans la partie modèle théorique pour les unités de récupération de chaleur. Toutes les parcelles coloriées en rouge sont constructibles, en zone non inondable, ont une surface supérieure à 4000m² et une longueur incluse dans la parcelle supérieure à 200 mètres. Elles sont donc éligibles. Les parcelles en bleu répondent aux mêmes exigences sauf qu'elles se situent en zone inondable (aléa 1 et 2). Dans le cas des eaux usées on peut se permettre d'implanter des unités en zones d'aléa 1 et 2 contrairement au cas de la méthanisation.

Pour déterminer les parcelles finales (cercles verts) d'autres critères entrent en jeu. L'objectif est de répartir les 9 parcelles finales de façon homogène sur le territoire d'étude en essayant de prendre en compte la densité du tissu urbain. C'est pour cette raison qu'on implante quatre unités entre le Cher et la Loire (E3, E4, E5 et E6), deux au Nord de la Loire (E1 et E2) et trois au Sud du Cher (E7, E8 et E9). De plus, on place les unités le plus proche possible des zones densément urbanisées. Les parcelles choisies permettent d'avoir des situations différentes d'un point de vue urbanistique. On a donc des unités proches de quartiers pavillonnaires et d'autres proches de grands ensembles.

Les photos aériennes de la figure 69 permettent de visualiser les 9 parcelles sélectionnées

Parcelles éligibles pour la récupération de la chaleur des eaux usées, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours



■ parcelles d'au moins 200m de long, éligibles pour implanter un récupérateur de chaleur des eaux usées

■ parcelles d'au moins 200m de long, éligibles pour implanter un récupérateur de chaleur des eaux usées, comprises dans le périmètre du PPRi

○ parcelles sélectionnées pour implanter un récupérateur de chaleur des eaux usées

□ limites communales

□ parcelles du Noyau Urbain de Tours

0 1 2 3 4 km

Source: BD TOPO MSH 2008, BD Parcellaire 2008
Réalisation : Groupe PFE "Modélisation d'un réseau de chaleur urbain"

Carte 19 : Parcelles éligibles pour la récupération de la chaleur des eaux usées, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours

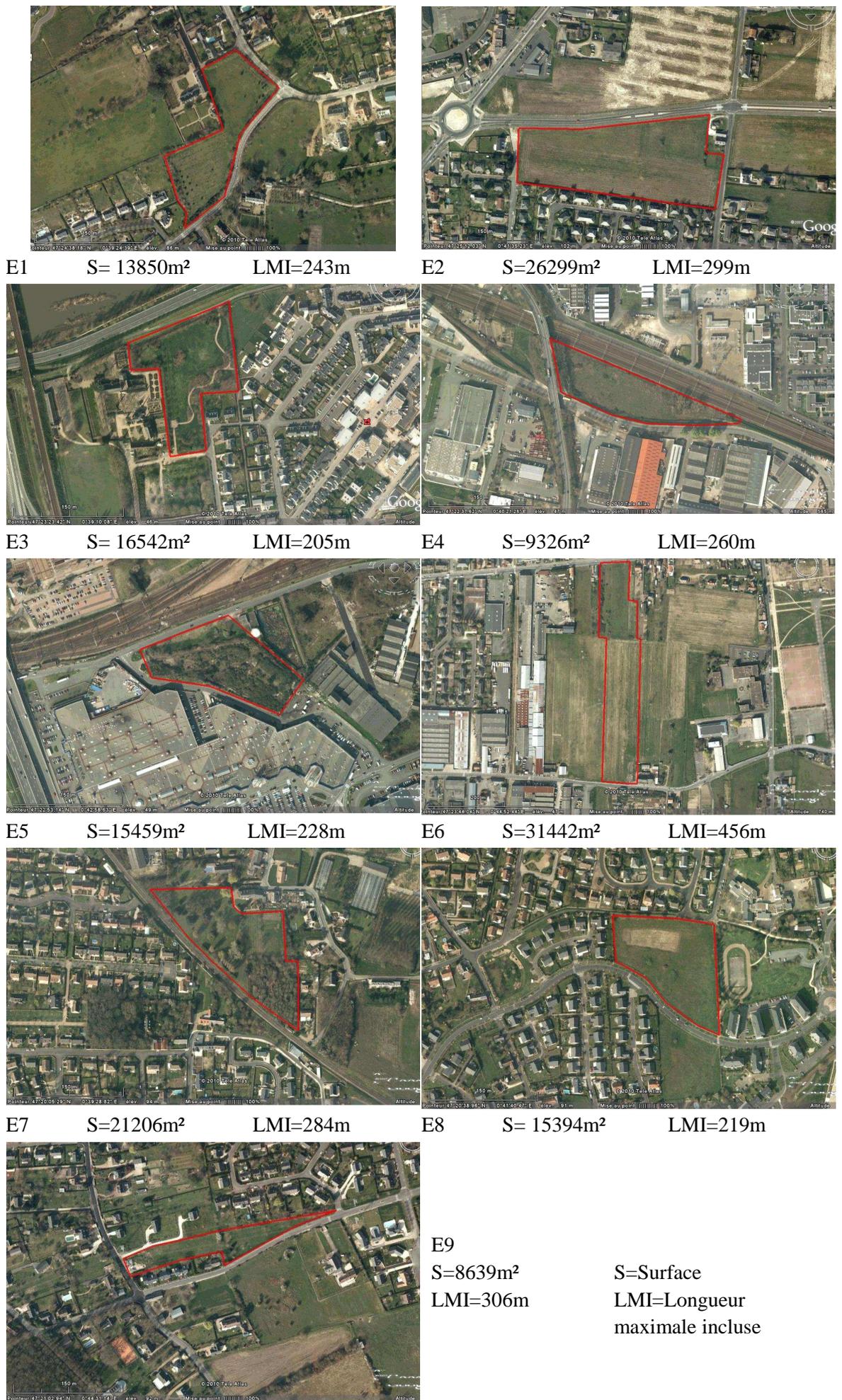


Figure 69 : Visualisation aérienne des 9 parcelles utilisées pour installer les unités de récupération de chaleur des eaux usées

c) Détermination des zones de collecte des eaux usées

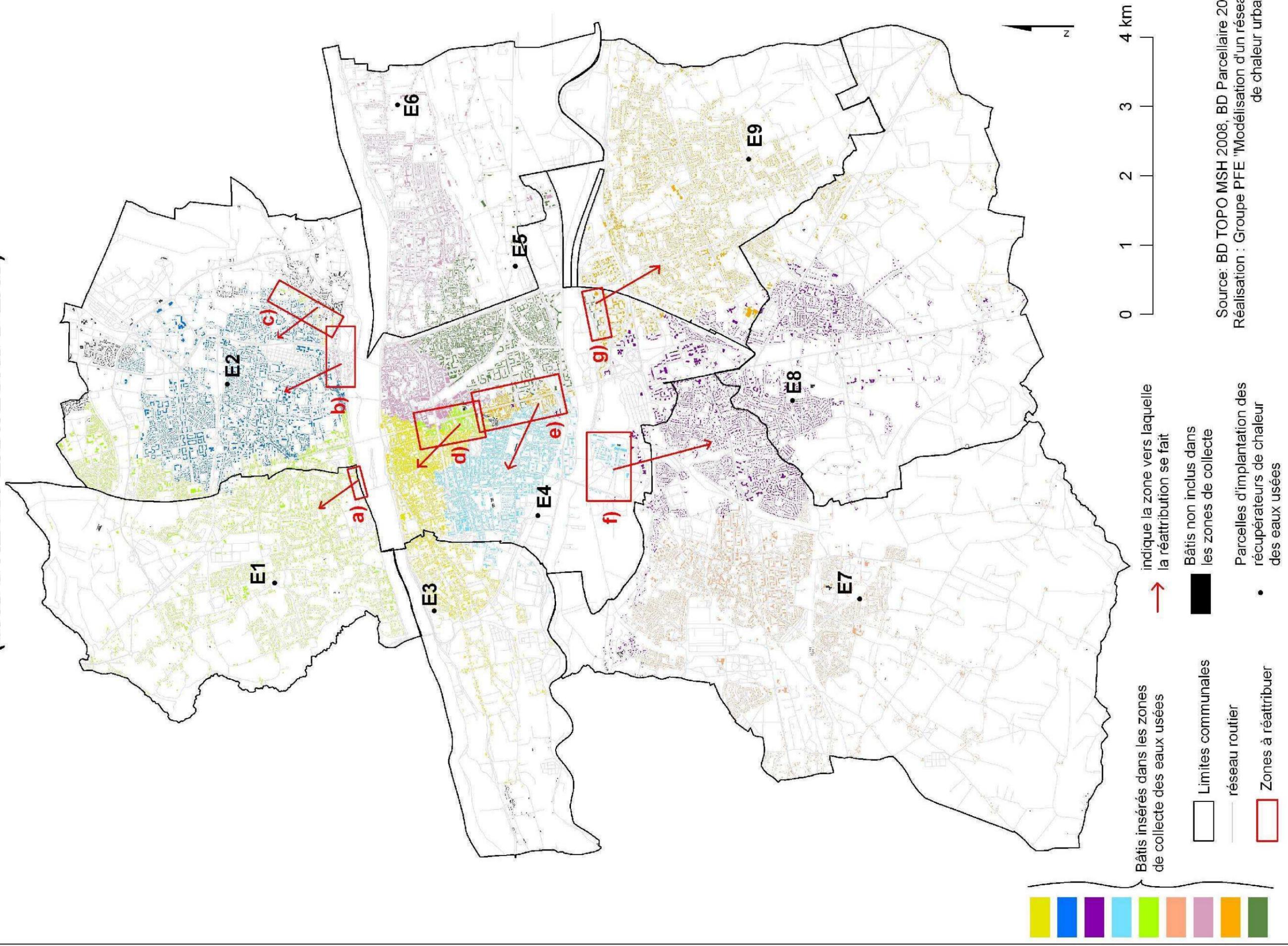
Une fois les parcelles finales déterminées, on construit les zones de collecte en eaux usées pour chaque unité de récupération de chaleur des eaux usées. Ces zones sont construites par le programme décrit en partie opérationnel et on obtient les zones de collecte visible sur la carte 20. L'architecture du programme fait que certaines zones de collecte n'ont pas de sens d'un point de vue urbain. C'est-à-dire une zone de collecte d'eaux usées non continue. On a donc fait le choix de réattribuer les zones concernées. Les zones à réattribuer sont encadrées en rouge sur la carte. Les raisons de ces réattributions sont de deux ordres. Tout d'abord on réattribue les zones qui sont détachées de leur zone principale, sans que ce soit dû à la morphologie du territoire, à une autre zone à proximité afin de former des zones uniformes (cadre b, c, d et e). On réattribue ensuite les zones de collecte séparées en deux à cause du Cher ou de la Loire aux zones les plus proches (a, f et g) à d'autres zones de collecte. Enfin il faut attribuer le bâti (en noir sur la carte) qui n'a pas été attribué par le programme afin de prendre en compte l'ensemble des habitants du Noyau Urbain. L'attribution se fait à la zone la plus proche.

Ces réattributions faites, on obtient la carte 21 qui visualise les zones de collecte finales. Les débits en sortie de réservoir ne sont donc plus identiques. Les changements de débits sont visibles dans le tableau ci-dessous.

Unité de récupération	Nombre d'habitants initial	Débit en l/s en sortie	Nombre habitants final	Débit en l/s en sortie
E1	25968	45,1	22581	39,2
E2	25964	45,1	30798	53,5
E3	25925	45,0	29428	51,1
E4	26038	45,2	29261	50,8
E5	25993	45,1	25272	43,9
E6	26018	45,2	25414	44,1
E7	25925	45,0	25953	45,1
E8	25930	45,0	27175	47,2
E9	26059	45,2	22455	39,0

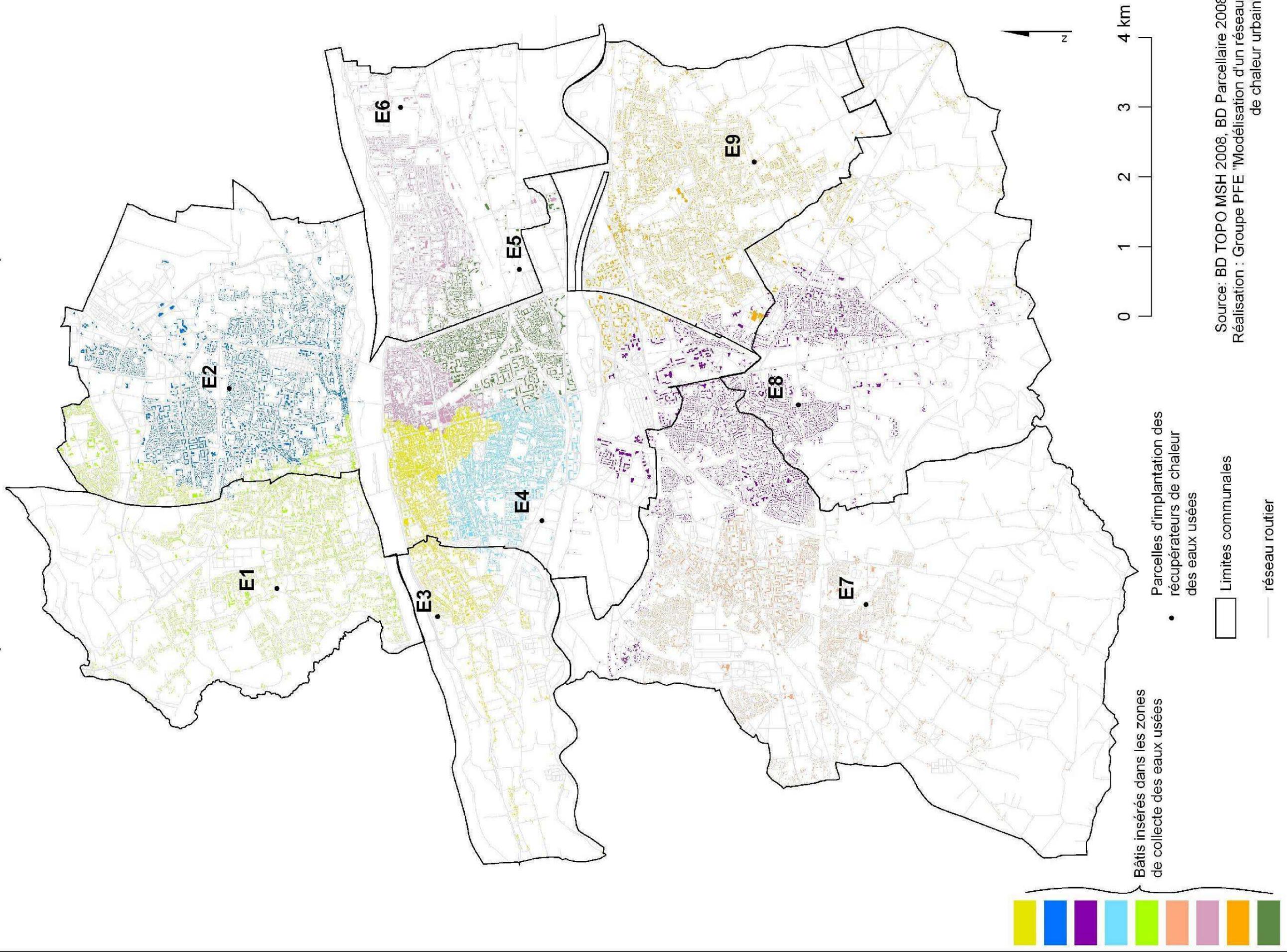
Figure 70 : Evolution des zones de collectes d'eaux usées

Zones de collecte pour alimenter les récupérateurs de chaleur des eaux usées, définies par le logiciel de calcul matriciel (CAS 9 RÉCUPÉRATEURS D'EAU)



Carte 20 : Zones de collecte pour alimenter les récupérateurs de chaleur des eaux usées, définies par le logiciel de calcul matriciel

Zones de collecte pour alimenter les récupérateurs de chaleur d'eaux usées (CAS 9 RÉCUPÉRATEURS D'EAU)



Source: BD TOPO MSH 2008, BD Parcellaire 2008
Réalisation : Groupe PFE "Modélisation d'un réseau de chaleur urbain"

Carte 21 : Zones de collecte pour alimenter les récupérateurs de chaleur des eaux usées

d) Détermination des zones de distribution de chaleur potentielles

Connaissant les débits d'eaux usées en sortie de réservoir de chaque unité de récupération de chaleur, il est alors possible de déterminer les zones où le bâti pourra être chauffé autour de ces unités à partir de la chaleur récupérée.

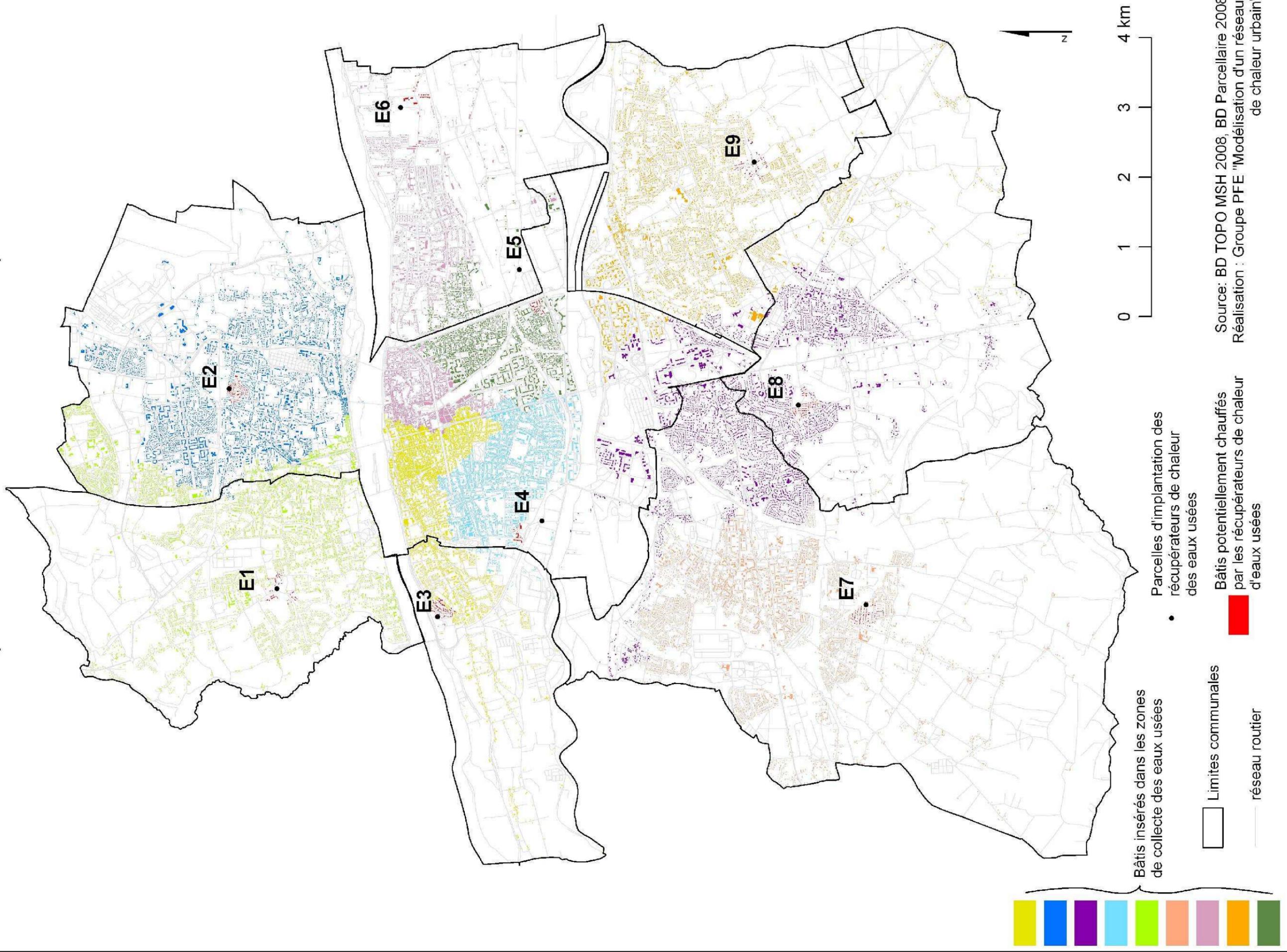
Comme on l'a vu précédemment, la quantité de chaleur pouvant être récupérée en kWh sur la période de chauffe est définie par :

$$Q = \text{Débit en litre par seconde} \times 8 \times \text{Nombre d'heures de chauffe}$$

Ainsi, au niveau du Noyau Urbain de Tours la récupération de chaleur des eaux usées permet de récupérer 19 067 MWh par an pour chauffer le bâti. La récupération de chaleur est répartie sur les 9 unités.

Les zones de chaleur visualisées sur les cartes qui suivent ne prennent pas en compte les pertes de chaleur dues à l'éloignement entre une partie du bâti à chauffer et la chaufferie de l'unité de récupération de chaleur des eaux usées. Ces zones de distribution ont pour objectif d'illustrer le potentiel de la récupération de chaleur des eaux usées afin de répondre à des besoins en chauffage. On évaluera donc le nombre d'habitants pouvant être chauffés ainsi que la surface habitable correspondante. On se place dans le cas où la récupération de chaleur des eaux usées couvre 100% des besoins en chauffage. Il ne s'agit pas de réseaux de chaleur.

Zones de collecte des eaux usées et zones de distribution potentielle de l'énergie depuis les récupérateurs de chaleur d'eaux usées (CAS 9 RÉCUPÉRATEURS D'EAU)



Source: BD TOPO MSH 2008, BD Parcellaire 2008
 Réalisation : Groupe PFE "Modélisation d'un réseau de chaleur urbain"

Carte 22 : Zones de collecte des eaux usées et zones de distribution potentielles de l'énergie depuis les récupérateurs de chaleur des eaux usées

Unité de récupération	Chaleur distribuée(en MWh)	Nombre d'habitants	Surface habitable chauffée en m ²
E1	1802,77	161	16741
E2	2453,41	251	24500
E3	2341,99	347	27141
E4	2316,23	428	35580
E5	2018,00	285	20181
E6	2032,31	278	21840
E7	2060,86	223	22007
E8	2173,90	236	22555
E9	1773,00	197	18503
Total 9 unités			
	18972,47	2406	209048
% NUT			
	0,94	1	0,89

Figure 71 : Caractéristiques des zones de distribution potentielles de chaleur pour les eaux usées

Tout d'abord on remarque que la chaleur distribuée cumulée des 9 unités est légèrement inférieure au total récupérable sur le Noyau Urbain de Tours puisque mettre un bâtiment supplémentaire à chaque zone de distribution surpasserait la production des chaufferies de chaque unité de récupération.

On remarque également que les zones de distribution potentielles sont nettement plus petites que les zones de collecte d'eaux usées. On se rend alors compte de la proportion d'une telle technologie à chauffer les bâtiments d'un milieu urbain. La récupération de la chaleur des eaux usées de l'ensemble du NUT (238 397 habitants) permet de chauffer potentiellement 2406 habitants dans le cas du Noyau Urbain de Tours.

On remarque que la récupération des eaux usées permet de répondre à 0,94% des besoins en chauffage de notre territoire d'étude, couvre 1% des habitants et 0,89% de la surface habitable. Les pourcentages ne sont pas égaux du fait de l'hétérogénéité du tissu urbain en termes d'âge de construction et typologie du bâti. L'unité de récupération E4 peut chauffer une surface habitable plus importante que les autres du fait que cette unité se situe à proximité de grands ensemble.

e) Bilan du potentiel de la méthanisation et de la récupération de chaleur des eaux usées

On se rend compte que la méthanisation et la récupération de chaleur des eaux usées ont le même poids énergétique afin de chauffer les bâtiments dans le cas du Noyau Urbain de Tours.

Ces zones de distribution de chaleur ne sont pas des réseaux de chaleur mais des zones illustrant le potentiel de la méthanisation et de la récupération de chaleur des eaux usées afin de répondre à des besoins en chauffage.

Dans la suite du rapport on verra comment on peut construire les réseaux de chaleur.

1.7 Mise en place des réseaux de chaleur

a) Création des réseaux de distribution de chaleur

i) Choix des réseaux traités

Nous n'avons pas créé de réseaux de chaleur pour l'ensemble des usines bois, méthanisation et eaux usées. Nous avons sélectionné :

- Une chaufferie bois en A4, située à la limite entre Chambray-lès-Tours et Joué-lès-Tours proche d'une zone pavillonnaire
- Les usines de méthanisation du scénario à deux usines, C1 se situant à Tours Nord à proximité de grands ensembles et C2 au même emplacement que A4
- Deux équipements de récupération des eaux usées, E4 proche du quartier des Rives du Cher et E8 à Chambray-lès-Tours proche d'une zone pavillonnaire et de logements sociaux.

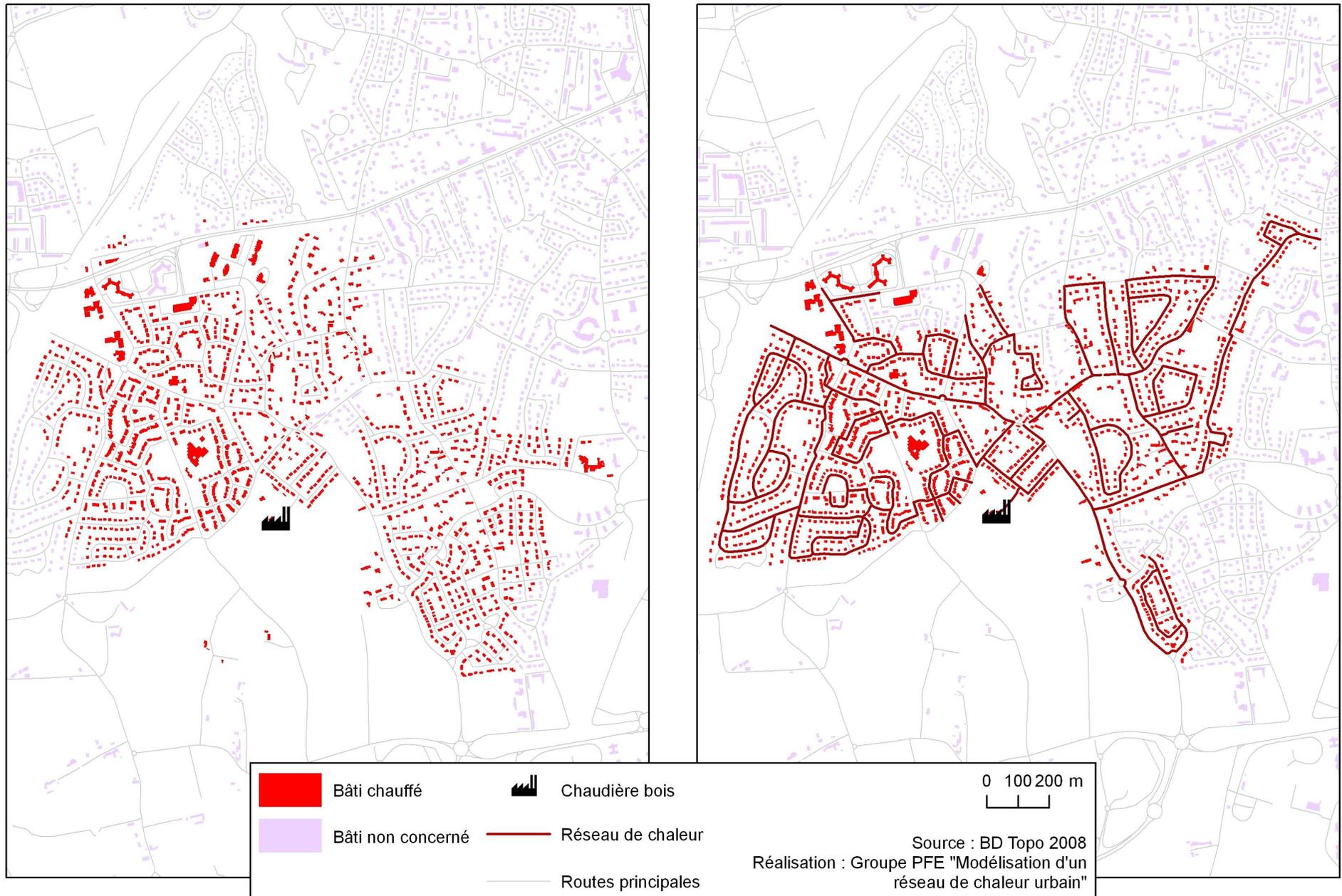
Nous pourrions ainsi analyser l'impact de la forme urbaine sur la rentabilité du réseau. Le centre-ville n'est pas représenté du fait de l'absence de parcelle pouvant accueillir un équipement de production de chaleur.

ii) Création des réseaux

Après avoir choisi les réseaux observés, nous les avons réalisés en suivant la méthodologie détaillée dans la partie précédente. Les cartes 23 à 27 présentent ces résultats.

Zone de distribution potentielle pour la parcelle A4 (Sc. 0)

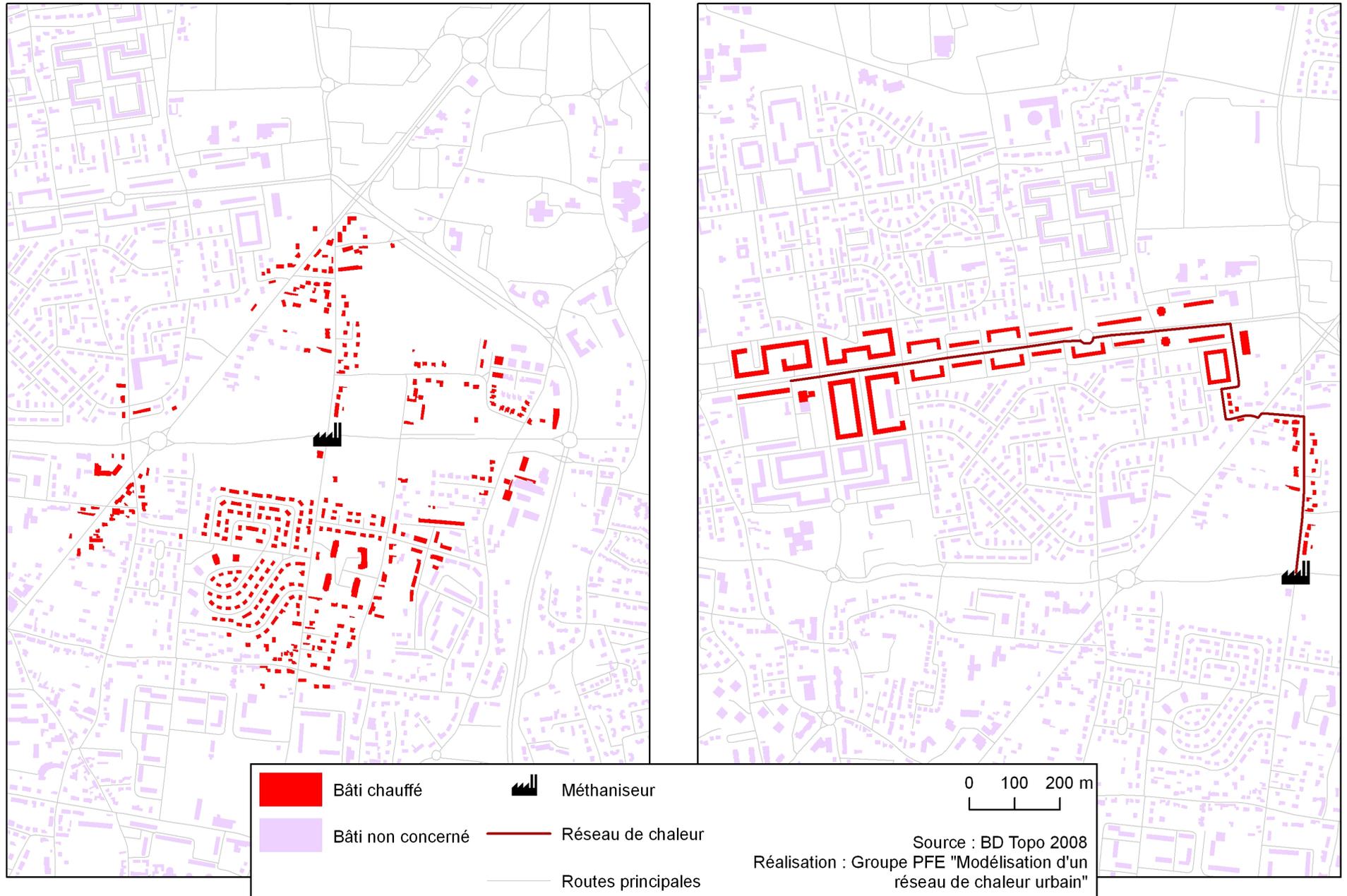
Solution de réseau de chaleur pour la parcelle A4 (Sc. 0)



Carte 23 : Zone de distribution potentielle et solution de réseau de chaleur pour la parcelle A4

Zone de distribution potentielle pour la parcelle C1 (Sc. 0)

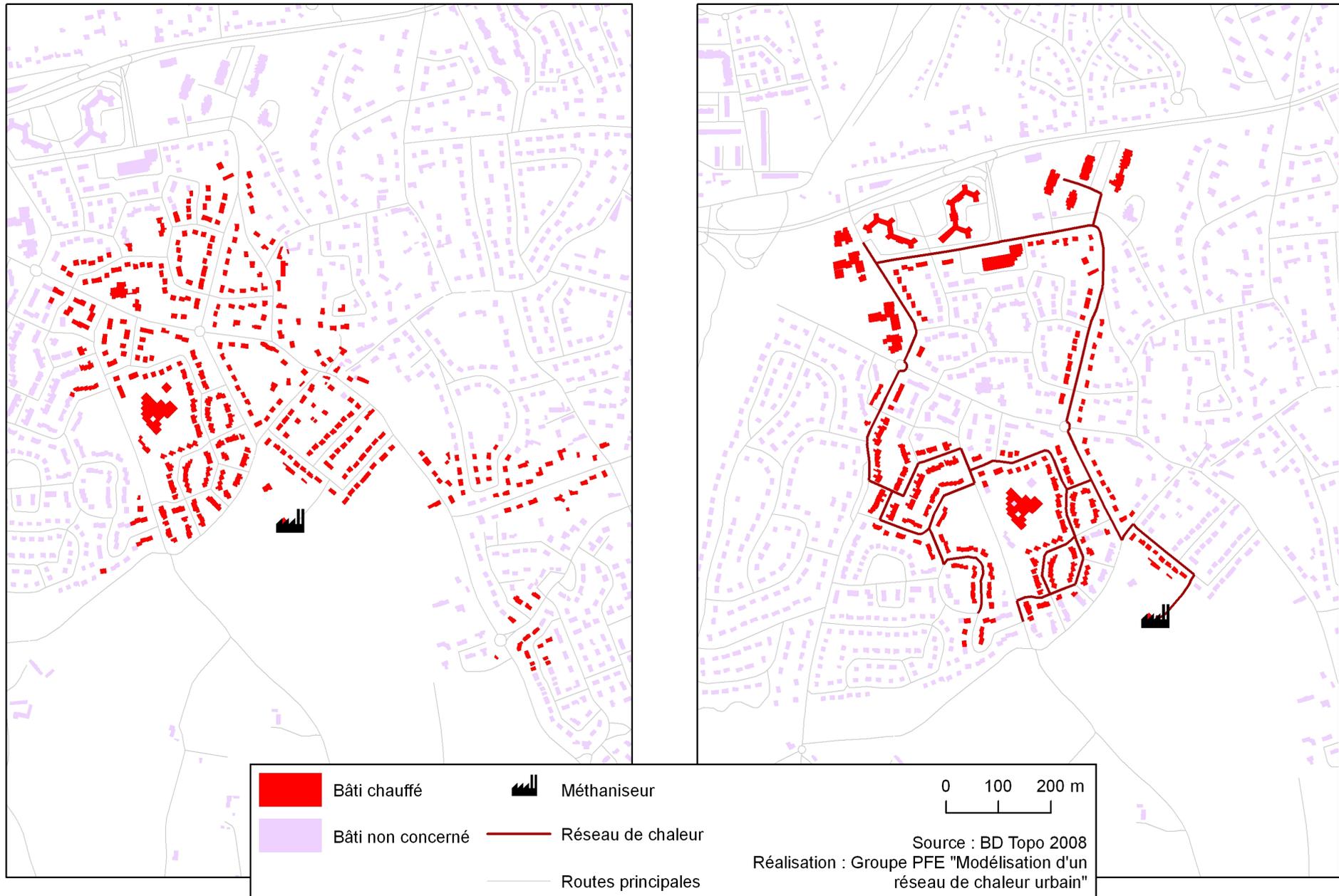
Solution de réseau de chaleur pour la parcelle C1 (Sc. 0)



Carte 24 : Zone de distribution potentielle et solution de réseau de chaleur pour la parcelle C1

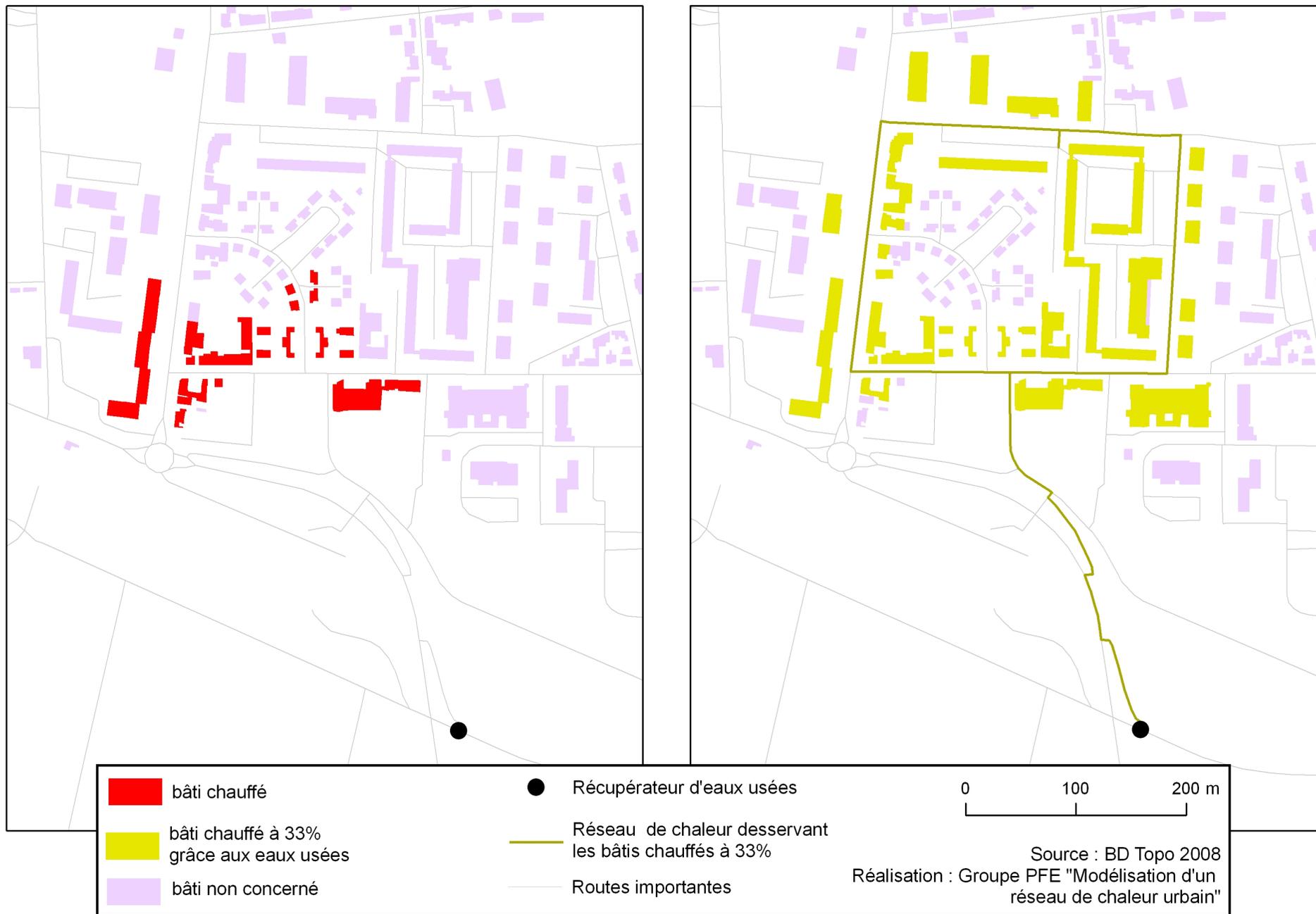
Zone de distribution potentielle pour la parcelle C2 (Sc. 0)

Solution de réseau de chaleur pour la parcelle C2 (Sc. 0)



Zone de distribution potentielle pour la parcelle E4 (Sc. 0)

Solution de réseau de chaleur pour la parcelle E4 (Sc. 0)

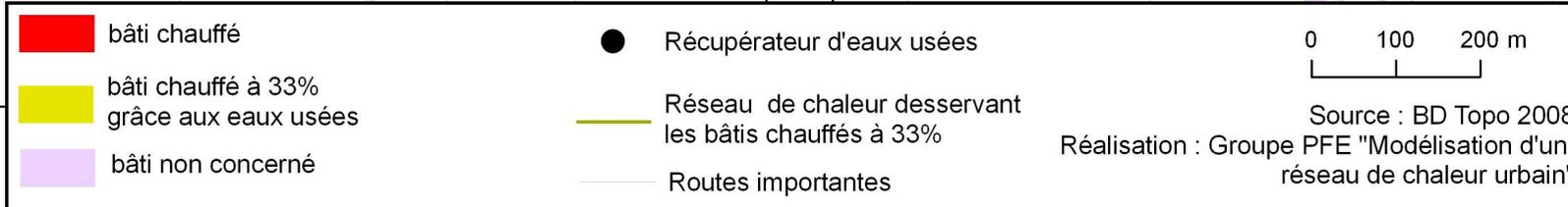


Carte 26 : Zone de distribution potentielle et solution de réseau de chaleur pour la parcelle E4

Zone de distribution potentielle pour la parcelle E8 (Sc. 0)



Solution de réseau de chaleur pour la parcelle E8 (Sc. 0)



Carte 27 : Zone de distribution potentielle et solution de réseau de chaleur pour la parcelle E8

b) Analyse des résultats obtenus pour le Noyau Urbain de Tours

	E4		E8		C2		C1		A4	
	Scénario 0		Scénario 0		Scénario 0		Scénario 0		Scénario 0	
	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur (33% par les eaux usées)	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur (33% par les eaux usées)	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur (100% par méthanisation)	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur (100% par méthanisation)	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur (100% par bois)
Énergie distribuée (en MWh)	2316,23	7017,68	2173,9	6516,76	9826,43	9807,65	9798,82	9823,69	32497,59	32449,51
Longueur du réseau routier (en km)	/	1,391	/	5,162	/	3,66	/	1,762	/	17,986
Rentabilité du réseau (en MWh/m)	/	5,05	/	1,26	/	2,68	/	5,58	/	1,8
Population desservie (en nb d'hab)	428	1578	236	697	1106	1858	922	2713	4174	4155

Figure 72 : Impact de la création du réseau sur la zone desservie

Dans le cas des eaux usées, l'énergie distribuée par le réseau de chaleur est trois fois plus importante que celle de la zone de distribution potentielle. Cela est dû au fait, comme nous l'avons exposé précédemment, que seuls 33% des besoins sont couverts par l'énergie récupérée des eaux usées. La population desservie triple elle aussi pour la même raison.

La population desservie réellement est plus importante que celle potentiellement desservie pour C1 et C2 car on cherche à desservir en priorité les zones d'habitats collectifs, qui concentrent une population et des besoins plus importants sur une zone moins grande. On peut cependant remarquer que la variation est plus importante pour C1 qui se trouve à proximité de grands ensembles alors que, C2 et A4 sont plus proches de zones d'habitat pavillonnaire malgré le fait que le réseau de chaleur C2 possède quelques collectifs.

Pour les usines de méthanisation, il y a une légère variation de la quantité d'énergie redistribuée. Cette variation n'est pas significative, elle est liée à la sélection des bâtiments qui seront approvisionnés par le réseau. Il en va de même pour le bois.

Il y a une différence de 6,7% entre l'énergie distribuée par le réseau pour E4 et E8. On peut considérer que l'influence de cette variation est minime sur la différence entre les rentabilités des deux réseaux. Ceci est encore plus vrai pour C1 et C2 où la quantité d'énergie distribuée varie de 0,16%.

La longueur de réseau varie du simple au double, voire au quadruple entre les zones d'habitat collectif et celles d'habitat pavillonnaire. Cette variation se répercute sur la densité thermique des réseaux.

Ainsi, les réseaux de C1 et E4 ont une densité légèrement supérieure à 5 MWh/ml, largement au dessus du seuil de l'Ademe et supérieur au seuil recommandé par les professionnels. Ce sont les deux réseaux qui se trouvent en zones d'habitat collectif.

Au contraire, les réseaux de C2, E8 et A4 ont une densité thermique qui varie entre 1,26 et 2,68 MWh/ml. Aucun n'atteint le seuil conseillé par les professionnels, mais seul le réseau d'E8 n'atteint pas le seuil de l'Ademe. Il s'agit de la centrale qui se trouve le plus en zone pavillonnaire. On ne trouve que quelques petits collectifs qui ne concentrent pas des besoins suffisants pour contrebalancer le poids du pavillonnaire. Le tissu urbain a donc une importance capitale pour la rentabilité des réseaux de chaleur.

Les pertes par le réseau n'ont pas été prises en compte lors de la création des réseaux. Elles s'élèvent à environ 10% de l'énergie qui transite par le réseau. On couvre donc les besoins de moins de logements, ce qui signifie que la longueur du réseau va elle aussi diminuer. La rentabilité va donc varier mais cela ne devrait pas être significatif au point de rendre un réseau rentable non rentable.

1.8 Mise en place d'indicateurs de comparaison des scénarios

Nous venons donc de décrire ce que nous considérerons comme le scénario 0, il représente la modélisation à l'état actuel. Afin de pouvoir comparer des scénarios entre eux nous avons mis en place des indicateurs.

Nous pourrons ainsi comparer les réseaux selon différentes caractéristiques :

- L'énergie à distribuée en Wh
- La longueur du réseau en m
- La rentabilité du réseau
- La population chauffée
- La surface forêt équivalente à la consommation de bois pour les réseaux concernés

Il faut distinguer les données qui sont calculées à partir des zones de distributions potentielles et celles calculées à partir de la solution de réseaux de chaleur considérée. Cela induit que les indicateurs liés au réseau (longueur, rentabilité) n'existent pas pour les zones de distribution potentielles. Ainsi nous présenterons les indicateurs dans des tableaux comparatifs: deux colonnes distinctes permettront de distinguer les données tirées des zones des distributions potentielles et des zones alimentées par nos solutions de réseaux de chaleur.

2. Scénarios et prospectives

Suite à l'élaboration de la modélisation de cinq réseaux de chaleur, nous allons maintenant étudier l'impact de certains comportements ou de certaines actions sur ces réseaux de chaleur. La mise en œuvre de réseaux de chaleur s'inscrit dans les démarches de développement durable. Nous nous intéresserons donc aux impacts d'actions promues par les politiques de développement durable en France, comme la réduction de nos rejets d'eaux usées.

Dans un premier temps nous réaliserons des scénarios qui prennent en compte le changement d'un seul paramètre à la fois :

- Diminution de la quantité de déchets produits par habitant
- Diminution de la quantité d'eaux usées rejetées par habitant,
- Amélioration des vitrages
- Amélioration de l'isolation des parois opaques

Dans un second temps, nous combinerons ces scénarios afin de modéliser les réseaux de chaleur d'ici à 2030.

L'analyse de ces scénarios se fera en comparaison avec le scénario 0. Chaque scénario sera étudié sur un ou deux réseaux de chaleur.

Scénario	Réseaux de chaleur étudiés
0 : scénario actuel	A4, C1, C2, E4, E8
1 : diminution des déchets	C1 et C2
2 : diminution des eaux usées	E4 et E8
3 : amélioration des vitrages	A4 et C1
4 : amélioration de l'isolation des murs	C1
5 : combinaison de scénarios n°1	C2
6 : combinaison de scénarios n°2	C2

Figure 73 : Correspondances réseau de chaleur et scénarios

2.1 Modification d'un seul paramètre

a) Modification de l'offre

i) Scénario 1 : diminution des déchets

Ce scénario consiste à considérer ce qui se serait passé si un effort avait été réalisé sur la production de déchets. Sur la production annuelle de 183,3 kg par an et par habitant, la partie déchets verts qui constitue 120 kg ne peut pas être diminuée. On peut donc uniquement jouer sur la partie putrescible hors déchets verts. D'après l'ADEME en évitant le gaspillage de produits neufs, la part putrescible hors déchets verts pourrait être réduite de 7 kg par an et par habitant. On se base sur ce chiffre pour créer notre scénario de diminution de la production de déchets. La production annuelle par habitant passe alors à 176,3 kg, soit une baisse de 3,8%. On va donc pouvoir comparer l'influence de ce paramètre sur un réseau de chaleur.

Pour réaliser cette comparaison, on va prendre l'exemple des parcelles d'implantation des unités de méthanisation : C1 et C2.

La comparaison se fera sur les zones de distribution potentielles ainsi que sur une solution de réseau de chaleur.

	C1				C2			
	Scénario 0		Scénario 1 (-3,8%)		Scénario 0		Scénario 1 (-3,8%)	
	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur
Énergie redistribuée (en MWh)	9798,82	9823,69	9458,10	9457,57	9826,43	9807,65	9434,49	9443,59
Longueur du réseau routier (en m)	/	1762	/	1762	/	3664	/	3554
Rentabilité du réseau (en MWh/m)	/	5,58	/	5,37	/	2,68	/	2,66
Population desservie (en nb d'hab)	922	2713	895	2690	1106	1858	1064	1821

Figure 74: Tableau des caractéristiques des réseaux de chaleur C1 et C2 pour les scénarios 0 et 1

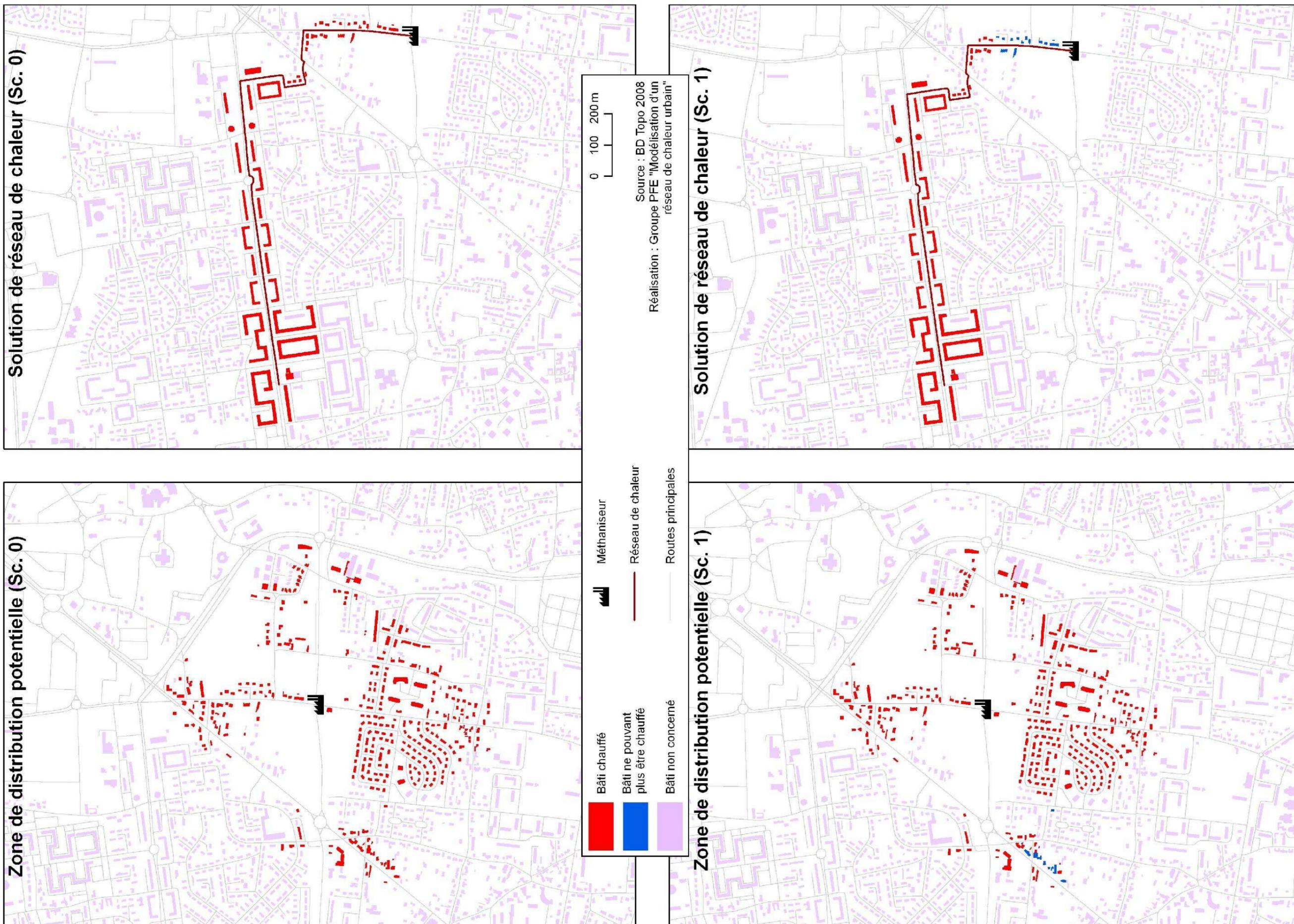
L'application d'un scénario de -3,8% de production déchets entraîne obligatoirement une diminution de 3,8% également de l'énergie à redistribuer car l'énergie à distribuer est directement proportionnelle à la production de déchets.

Pour la parcelle C1, la carte 28 montre que la diminution de déchets n'entraîne pas une réduction de la longueur du réseau de chaleur. Malgré la diminution de production de chaleur liée à la baisse de la quantité de déchets, les grands ensembles situés au nord ouest de l'unité de méthanisation peuvent toujours être alimentés. Seule une douzaine de pavillons à proximité de l'usine ne sont plus chauffés. La rentabilité du réseau est donc diminuée mais reste largement rentable. Elle passe de 5,58 MWh/m à 5,37 MWh/m.

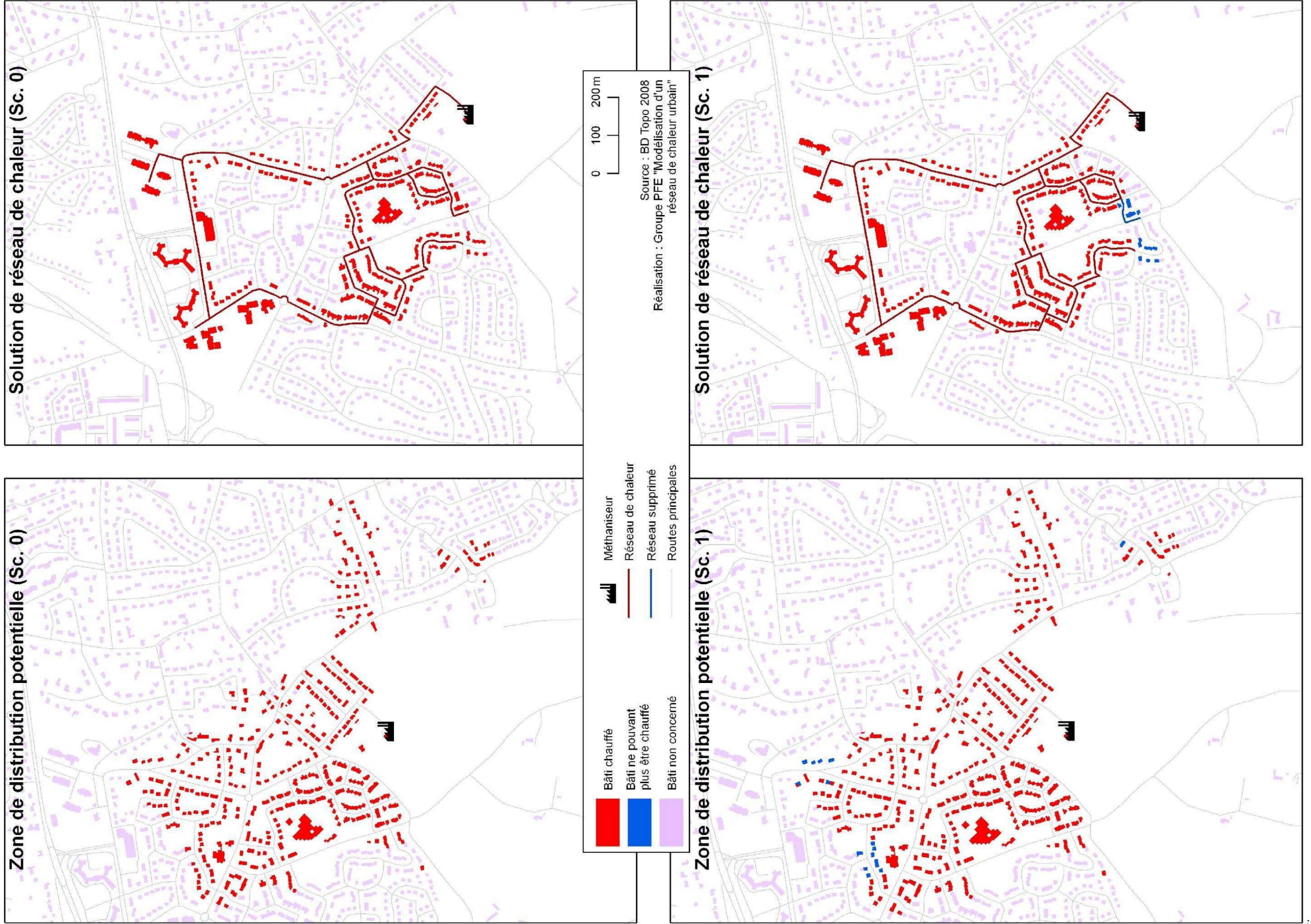
Pour la parcelle C2, carte 29, la longueur du réseau de chaleur diminue de 110 m, soit 3%. D'un point de vue de la rentabilité cette diminution de longueur permet presque de compenser la baisse de production de chaleur de 3,8%. La rentabilité reste donc quasiment inchangée ; elle passe de 2,68MWh/m à 2,66MWh/m.

On voit donc qu'une diminution de 3,8% de la production de déchets n'a que peu d'influence sur les réseaux de chaleur et les zones de distribution potentielles. Selon la configuration du réseau de chaleur une légère baisse de rentabilité peut être observée.

Conséquences pour la parcelle C1 d'une diminution de 3,8% des déchets (Sc. 1)



Conséquences pour la parcelle C2 d'une diminution de 3,8% des déchets (Sc. 1)



Carte 29 : Conséquences pour la parcelle C2 d'une diminution de 3,8% des déchets (Sc. 1)

ii) Scénario 2 : diminution des eaux usées

Ce scénario consiste à considérer ce qui se serait passé si un effort avait été réalisé sur la consommation d'eau et par conséquent sur la production d'eaux usées. Un objectif chiffré de cette baisse ressort de plusieurs documents¹ : la consommation d'eau aurait diminuée de 40% si on avait réalisé des efforts. Dans ce scénario, on considère les bâtiments actuels et on cherche donc à connaître les caractéristiques des réseaux de chaleur si on produisait aujourd'hui 40% d'eaux usées en moins.

Pour réaliser cette comparaison, on va prendre l'exemple des parcelles d'implantation des récupérateurs de chaleur des eaux usées : E4 et E8. La comparaison se fera sur les zones de distribution potentielles ainsi que sur une solution de réseau de chaleur.

	E4				E8			
	Scénario 0		Scénario 2 (-40%)		Scénario 0		Scénario 2 (-40%)	
	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur (33% par les eaux usées)	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur (33% par les eaux usées)	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur (33% par les eaux usées)	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur (33% par les eaux usées)
Énergie redistribuée (en MWh)	2316,23	7017,68	1395,04	4206,05	2173,88	6516,76	1293,99	3907,77
Longueur du réseau routier (en m)	/	1391	/	857	/	5162	/	3066
Rentabilité du réseau (en MWh/m)	/	5,05	/	4,91	/	1,26	/	1,26
Population desservie (en nb d'hab)	428	1578	206	1095	236	697	151	453

Figure 75 : Tableau des caractéristiques des réseaux de chaleur E4 et E8 pour les scénarios 0 et 2

L'application d'un scénario de -40% de production d'eaux usées entraîne obligatoirement une diminution de 40% de l'énergie à redistribuer car l'énergie à distribuer est directement proportionnelle au volume d'eaux usées.

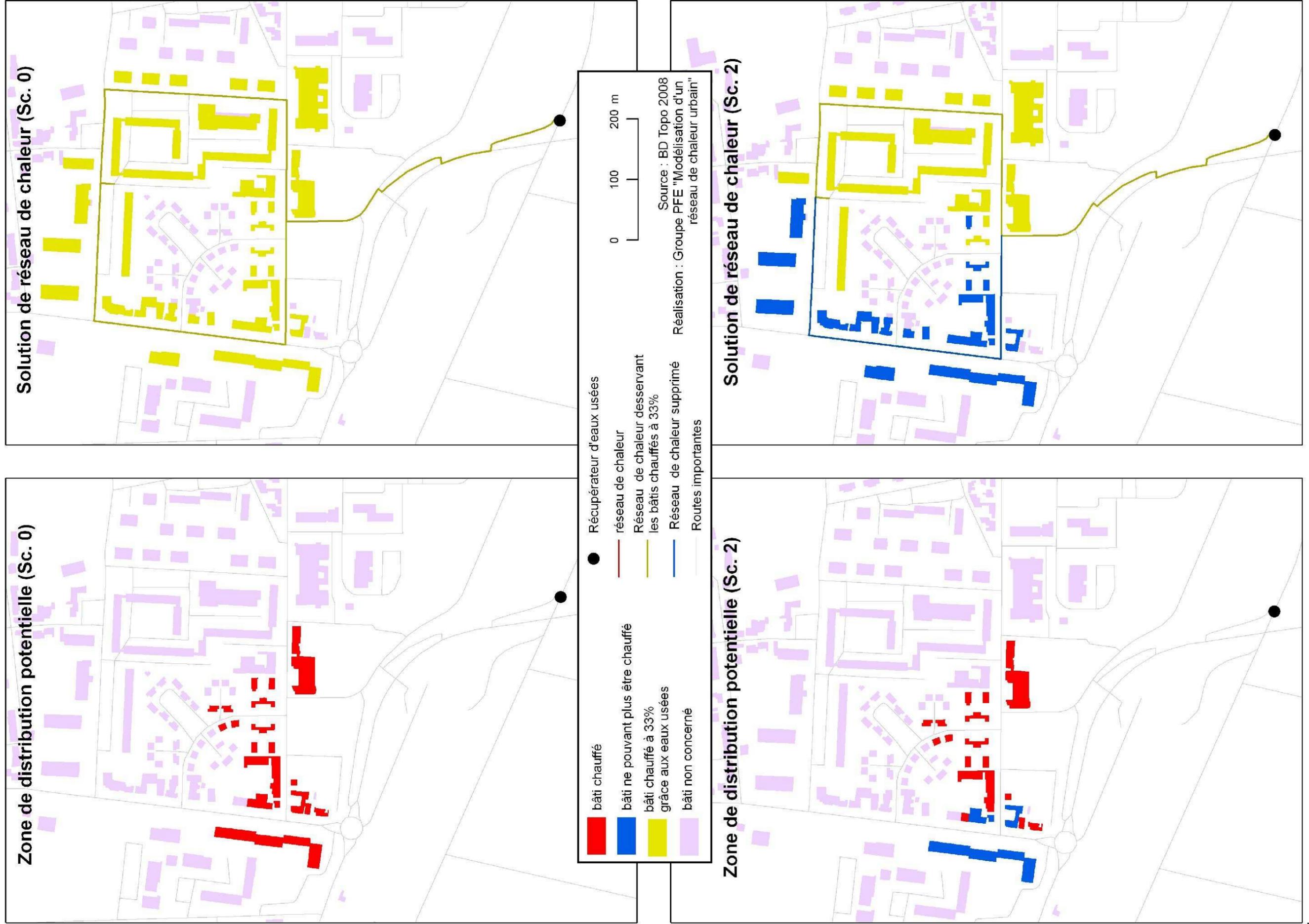
Pour la parcelle E4, carte 30, la zone de distribution potentielle alimente 50% de population en moins que le scénario 0. Par contre, pour la solution de réseau de chaleur, la population desservie diminue seulement de 30%. Par ailleurs la rentabilité du réseau reste très forte aux alentours de 5 MWh/m.

¹ Par exemple dans le Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE) de Gironde

Pour la parcelle E8, carte 31, pour la zone de distribution potentielle et la solution de réseau de chaleur, la population desservie diminue globalement de 40%, et la rentabilité reste similaire (1,26 MWh/m).

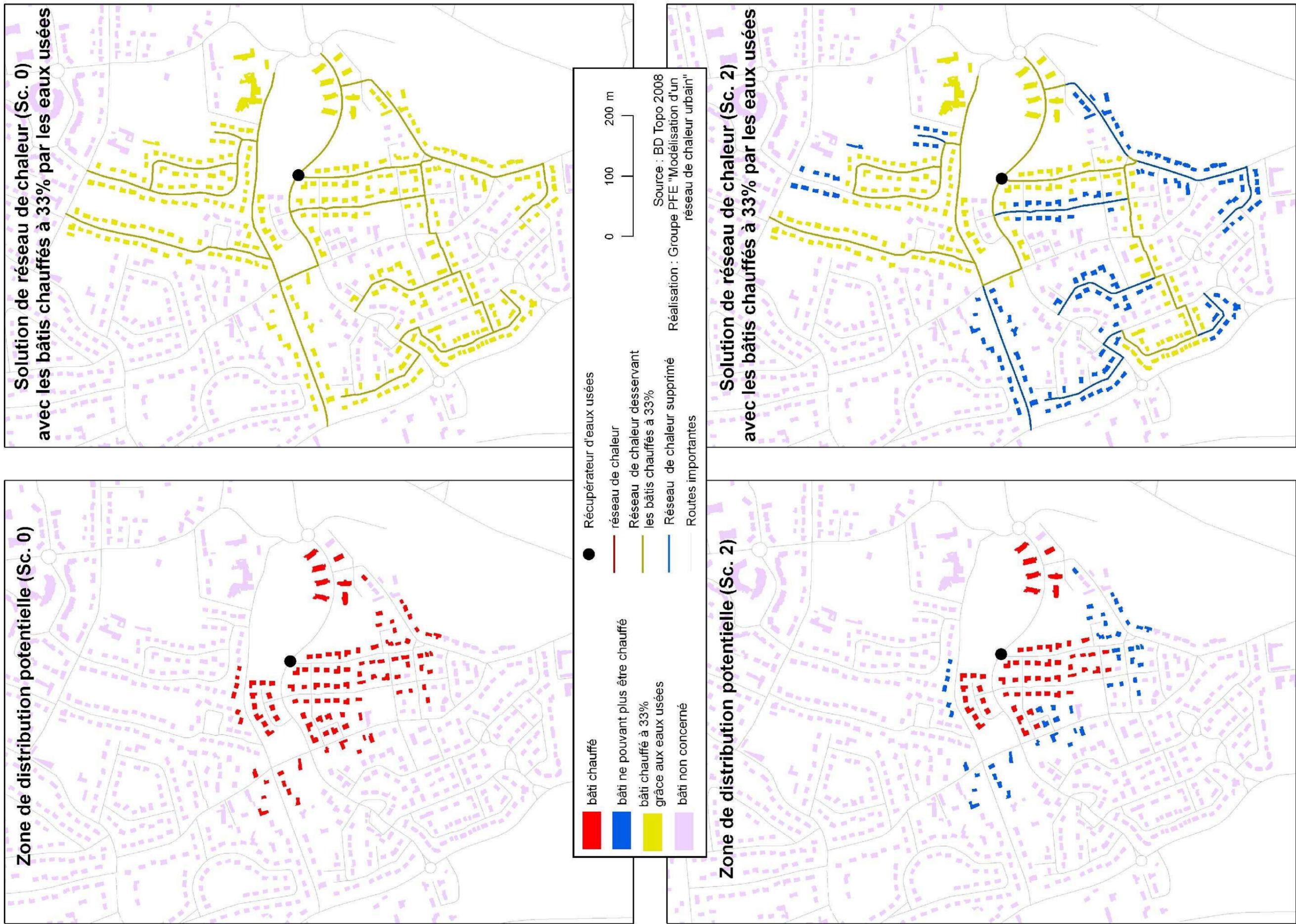
On voit donc qu'une diminution de 40% de la production des eaux usées ne change pas la rentabilité du réseau car le tissu urbain des zones chauffées est homogène. Les réseaux de chaleur sont donc plus petits mais diminuent de manière proportionnelle à la diminution de l'offre. Si le tissu urbain de la zone chauffée n'est pas homogène une diminution de la rentabilité peut apparaître. En effet, il est possible que l'on distribue moins d'énergie sans changer ou peu la longueur du réseau.

Conséquences pour la parcelle E4 d'une diminution de 40% du volume d'eaux usées (Sc. 2)



Carte 30: Conséquences pour la parcelle E4 d'une diminution de 40% du volume d'eaux usées (Sc. 2)

Conséquences pour la parcelle E8 d'une diminution de 40% du volume d'eaux usées (Sc. 2)



Carte 31: Conséquences pour la parcelle E8 d'une diminution de 40% du volume d'eaux usées (Sc. 2)

b) Modification de la demande

i) Scénario 3 : Amélioration du vitrage

Nous allons maintenant faire varier un paramètre qui concerne la demande : le vitrage. En effet, dans ce scénario nous considérerons que le coefficient de transmission surfacique des vitrages est de 1,1 W/(m².K). Dans le scénario actuel, seul les bâtiments récents atteignent cette performance. Nous scénarisons ainsi l'influence d'un renouvellement des vitrages sur le parc ancien. Cette amélioration du vitrage est censée réduire les pertes par les parois dues aux vitrages, elle réduit donc les besoins en énergie des bâtiments ayant du simple vitrage. Nous étudierons les conséquences de la variation de ce paramètre sur les réseaux de chaleur.

Nous appliquerons ce scénario sur un réseau de chaleur alimenté au bois (A4) et un réseau de chaleur alimenté par un méthaniseur (C1).

	A4				C1			
	Scénario 0		Scénario 3		Scénario 0		Scénario 3	
	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur
Énergie redistribuée (en MWh)	32497,59	32449,51	27948,57	27341,21	9798,82	9823,69	9816,26	9824,561
Longueur du réseau routier (en m)	/	17984	/	21260	/	1762	/	2868
Rentabilité du réseau (en MWh/m)	/	1,80	/	1,29	/	5,58	/	3,42
Population desservie (en nb d'hab)	4174	4155	5696	6836	922	2713	1589	4177
Ha de forêt équivalente au bois nécessaire	57	57	49	48	/	/	/	/

Figure 76: Tableau des caractéristiques des réseaux de chaleur A4 et C1 pour les scénarios 0 et 3

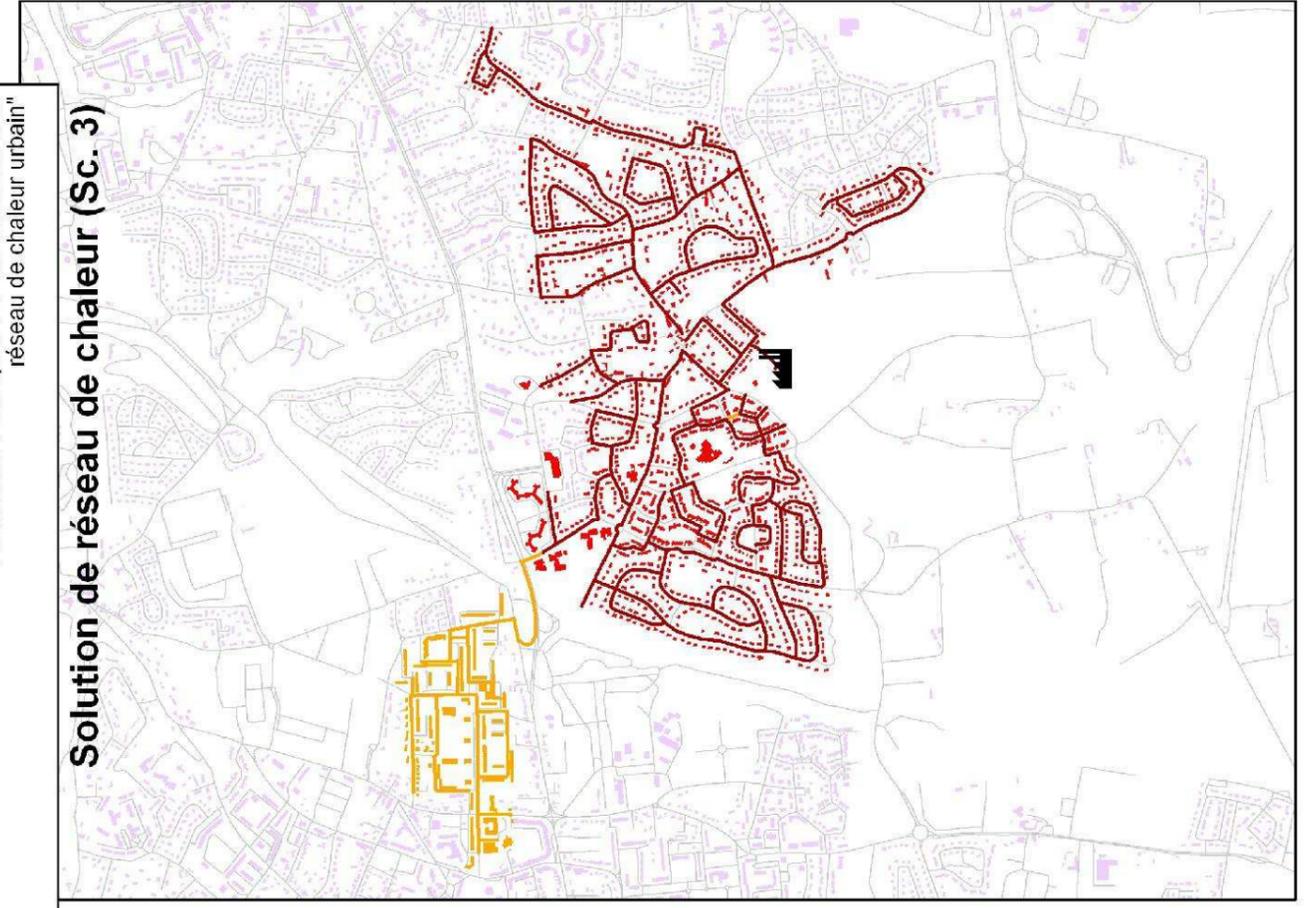
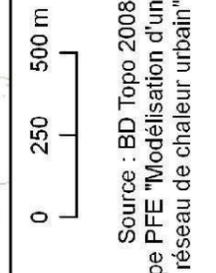
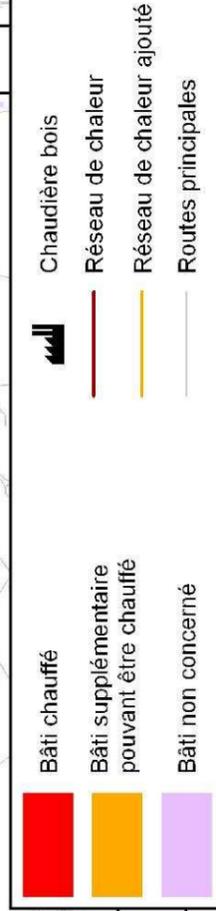
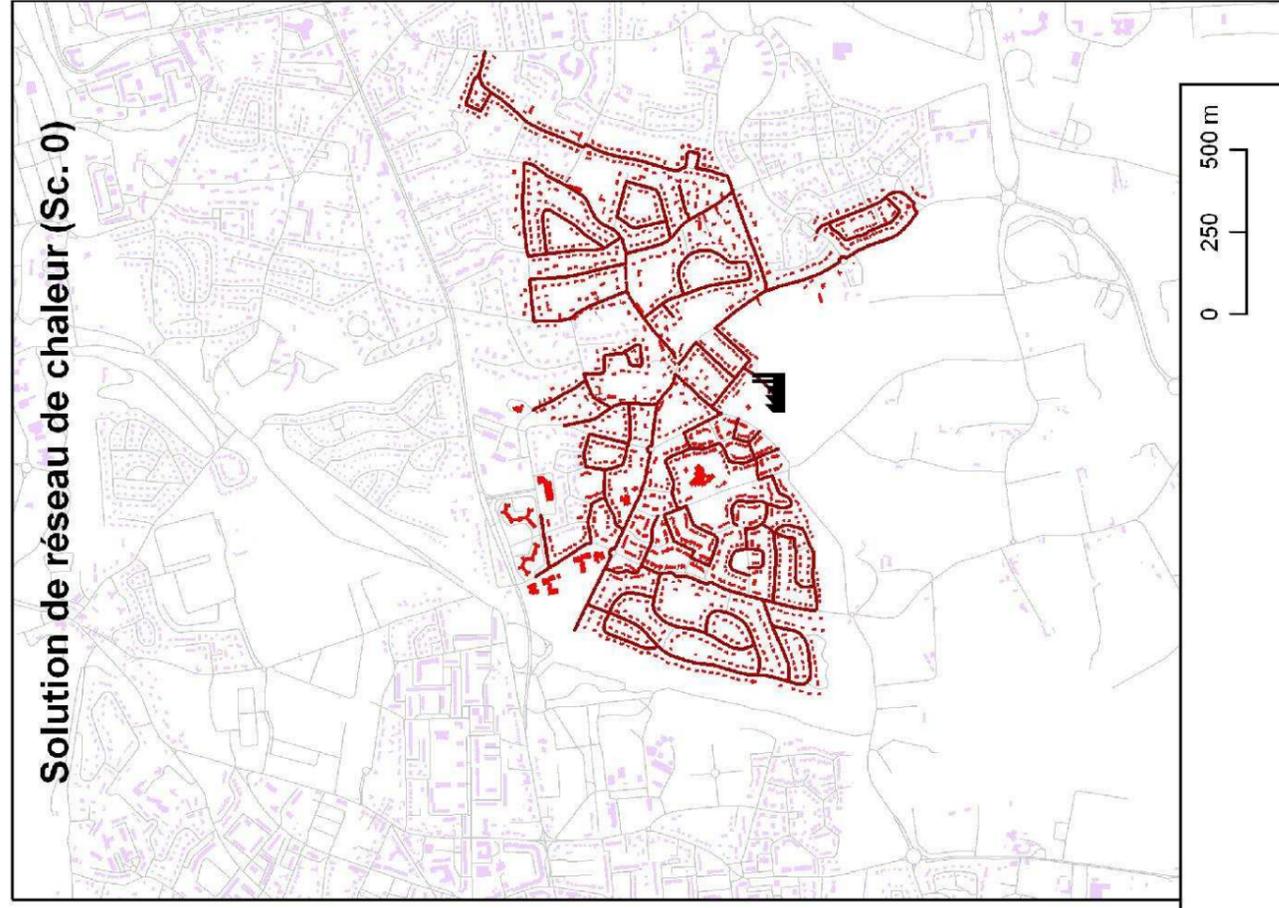
Etant donné que nous sommes dans un réseau de chaleur alimenté au bois, les bâtiments chauffés sont déterminés par le pic des consommations de chauffage. Nous pouvons remarquer tout d'abord que l'énergie distribuée sur le total de la période de chauffe par la chaufferie a diminué de 15%. Les consommations totales ont donc diminuées malgré l'agrandissement du réseau de chaleur de plus de 3 km. La quantité

de bois étant corrélée à l'énergie distribuée, celle-ci est diminuée également. Les vitrages ont eu un effet de diminution (35%) sur la demande en énergie des bâtiments.

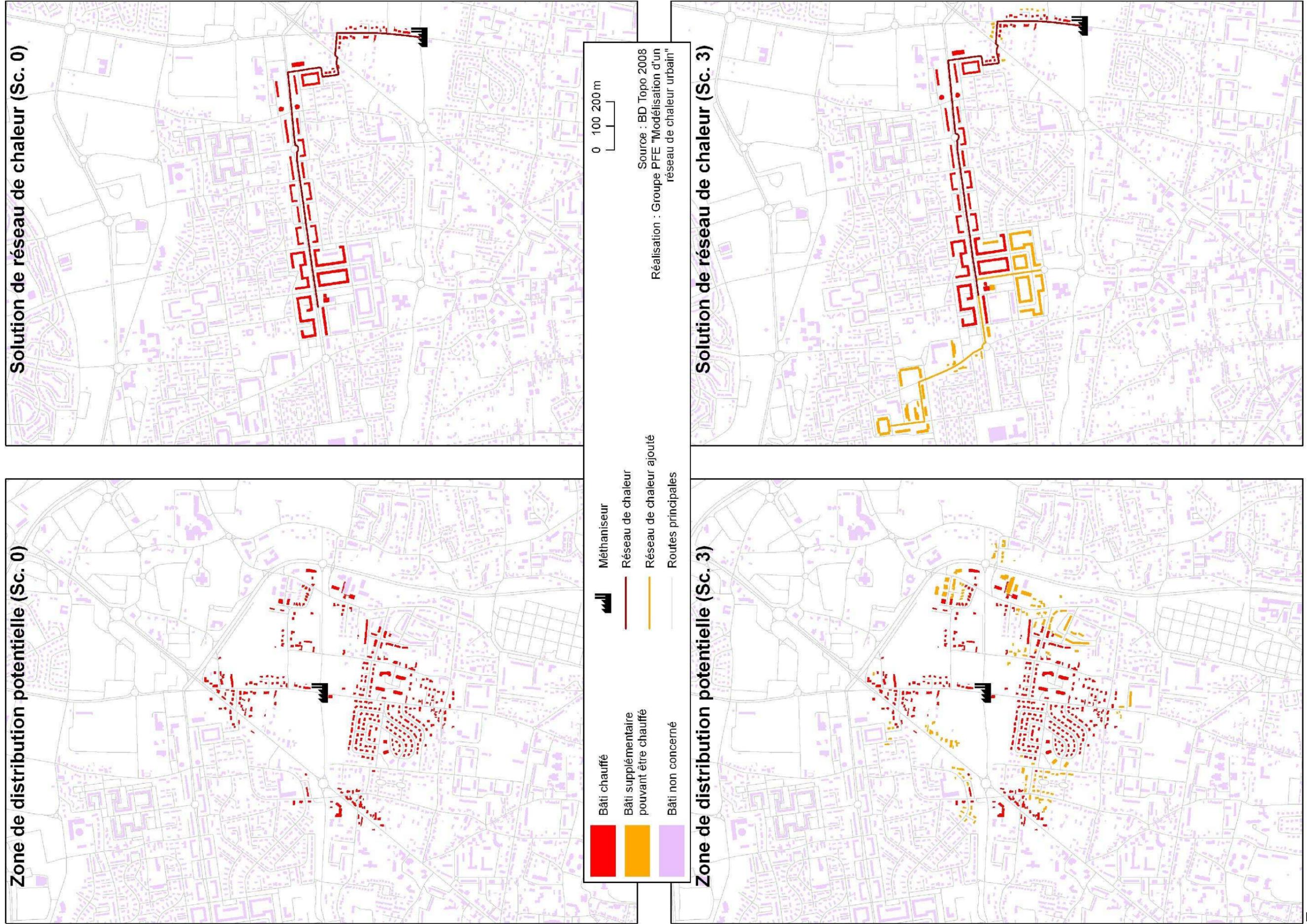
Comme le montre les cartes 32 et 33, le nombre de bâtiments chauffés augmente nettement lorsque l'on applique le scénario 3 à A4 et C1. Pour la chaudière A4 par exemple, le nombre d'habitants chauffés augmente de 39%.

Dans nos deux exemples, l'amélioration du vitrage a eu un impact assez important sur la rentabilité des réseaux de chaleur. En effet, celle-ci a diminué d'environ 30% dans les deux cas. Ceci s'explique par le fait que la réduction de la demande implique une augmentation de la longueur du réseau de chaleur pour aller chercher de nouvelles habitations tout en distribuant moins d'énergie.

Conséquence pour la parcelle A4 d'une amélioration des vitrages (Sc. 3)



Conséquences pour la parcelle C1 d'une amélioration des vitrages (Sc. 3)



Carte 33 : Conséquences pour la parcelle C1 d'une amélioration des vitrages (Sc. 3)

ii) Scénario 4 : Amélioration des parois opaques

Ce scénario consiste à considérer ce qui se serait passé si les parois opaques des bâtiments étaient de meilleure qualité, donc plus isolante. Nous allons faire varier la résistance thermique des murs : alors qu'elle oscillait entre 0,625 m².K/W et 2,2 m².K/W précédemment, nous la prenons égale à 2,2 m².K/W pour tout le bâti maintenant. Cette amélioration devrait permettre de réduire une partie des pertes par l'enveloppe, puisque les paramètres des surfaces vitrées resteront inchangés. L'influence de ce changement sera comparée avec le scénario 0, dans le cas de l'usine de méthanisation C1. Cette comparaison se fera sur les zones de distribution potentielles ainsi que sur une solution de réseau de chaleur.

	C1			
	Scénario 0		Scénario 4	
	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur	Zone de distribution potentielle	Solution de réseau de chaleur
Énergie redistribuée (en MWh)	9798,83	9823,69	9821,10	9827,02
Longueur du réseau routier (en m)	/	1762	/	5509
Rentabilité du réseau (en MWh/m)	/	5,58	/	1,78
Population desservie (en nb d'hab)	922	2713	2432	4914

Figure 77: Tableau des caractéristiques du réseau de chaleur C1 pour les scénarios 0 et 4

La première remarque porte sur le nombre d'habitants chauffés. Dans le cas de la zone de distribution potentielle, on passe de 922 habitants à 2432 soit 2,6 fois plus. Pour le réseau de chaleur, l'amélioration des parois opaques permet de chauffer 4914 personnes, soit 1,8 fois plus. Cette augmentation du nombre de personnes chauffées s'accompagne d'un allongement du réseau de chaleur. Sa longueur passe de 1762 mètres à 5509 mètres. Par conséquent, la rentabilité de ce réseau chute, puisque l'énergie à distribuer n'a pas changée. Elle passe de 5,58 MWh/m pour le scénario 0 à 1,78 MWh/m pour le scénario 4, ce qui représente une baisse de 68%. Cependant, le réseau reste rentable si l'on se base sur le critère de l'ADEME qui est de 1,5 MWh/m. Physiquement, sur la carte 34, on peut se rendre compte du nombre de bâtiments supplémentaires chauffés. Et si l'on s'intéresse à la surface habitable chauffée, elle passe de 149 913 m² à 319 857 m² une fois la rénovation des parois effectuée.

On peut donc se rendre compte qu'une amélioration des parois opaques sur l'ensemble du parc d'habitations a une très grande influence sur la demande en énergie des logements. En conséquence, si notre unité de méthanisation permet alors de chauffer un grand nombre supplémentaire de personnes, cela se fait au dépend de sa rentabilité puisque un allongement du réseau de chaleur est indispensable pour desservir de nouveaux immeubles.

Conséquences pour la parcelle C1 d'une isolation des parois (Sc. 4)



Carte 34: Conséquences pour la parcelle C1 d'une isolation des parois (Sc. 4)

2.2 Scénarios combinés

a) Scénario 5 : vision positive du point de vue environnemental

Ce scénario croise plusieurs indicateurs vus précédemment. Il consiste en une vision positive du point de vue environnemental, c'est-à-dire :

- Une augmentation de la population de 0,12% par an par densification,
- Une diminution de la production de déchets de 3,8%,
- Une isolation des vitrages des bâtiments avec $U_v = 1,1$
- Une isolation des parois opaques des bâtiments avec $R_{th}=2,2$
- Une diminution de la production d'eaux usées de 40%.

Nous allons appliquer ces changements au méthaniseur C2.

Changements au niveau de la demande en énergie :

D'ici à 2030, l'augmentation de population représente 6 717 habitants pour le Noyau Urbain de Tours. Actuellement, le réseau de chaleur C2 s'étend à cheval sur Joué-lès-Tours et Chambray-lès-Tours. Pour ces deux communes, la hausse représente 1308 habitants. De plus, l'emprise de C2 au scénario 0 est composée de maisons individuelles et d'immeubles collectifs, pour un total de 1 859 personnes.

On considère que l'on va densifier les zones où se trouvent les maisons individuelles. Cette opération est assimilée à une politique urbaine de densification par une augmentation du COS. Physiquement, cela consiste à démolir les maisons actuelles et construire du petit collectif pouvant accueillir le double de population. Concrètement, sous le logiciel SIG, on applique les modifications suivantes au bâti actuel que l'on densifie : multiplication par deux de la hauteur, de la surface habitable et donc de la population.

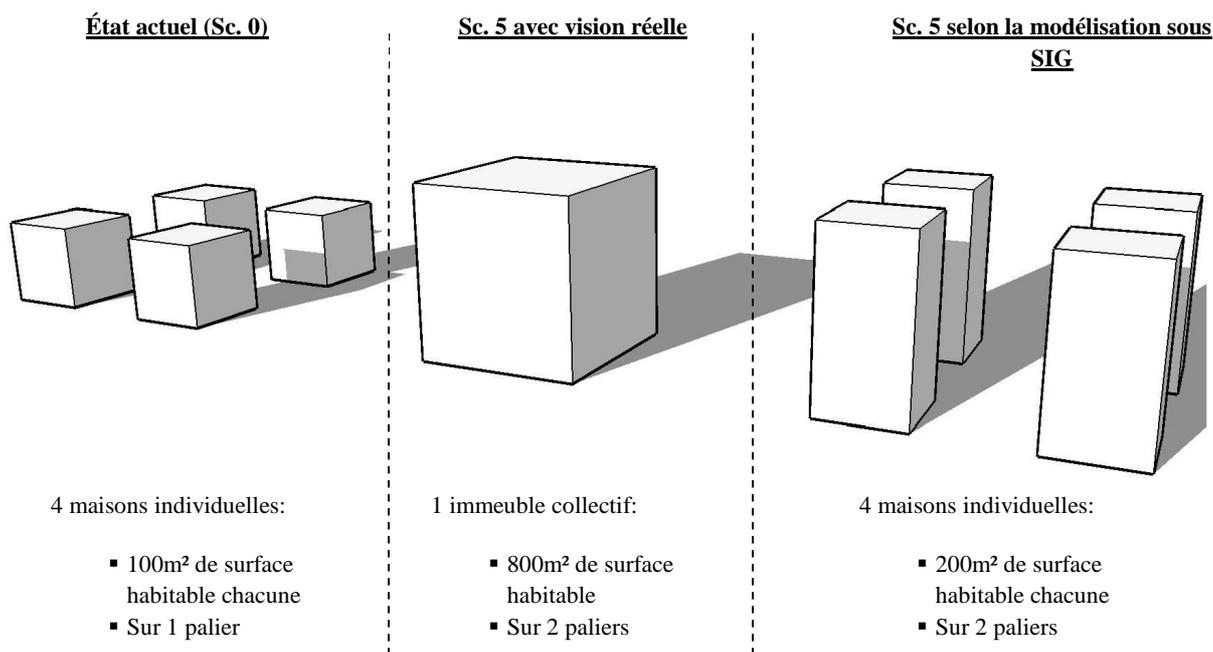


Figure 78 : Schéma de la méthode de densification utilisée

Notre zone ainsi densifiée accueille 682 habitants supplémentaires, soit 52% de la population supplémentaire des deux communes d'ici à 2030. Il faut par contre relativiser les résultats car les déperditions par les parois et les apports solaires sont différents entre la vision réelle et la méthode de modélisation sous SIG, mais celle-ci ne sera pas prise en compte dans le calcul.

Tous les bâtis du Noyau Urbain de Tours sont également isolés au niveau des vitres et des parois opaques avec une isolation maximum ($U_v = 1,1$ et $U_{bat} = 2,2$).

Changements au niveau de l'offre en énergie :

L'énergie à fournir au méthaniseur dépend de la quantité de déchets. Il redistribue actuellement 9,83 GWh. Avec l'augmentation de la population, on obtient des déchets supplémentaires qui seront répartis entre les usines C1 et C2.

Sachant qu'un habitant produit 183,3 kg de déchets putrescible par an, et qu'une tonne de déchets donne 450 MWh, cela représente la quantité de chaleur suivante pour la station C2 :

$$\text{Apport C2} = \frac{6717 \times 0,1833 \times 450}{2} = 277 \text{ MWh}$$

Notre méthaniseur porte donc sa capacité de chauffage à 10,11 GWh. Il faut maintenant appliquer le critère de réduction des déchets de 3,8%. La capacité de l'usine C2 va donc diminuer d'autant.

$$C2 = 10,11 \times (1 - 0,038) = 9,72 \text{ GWh}$$

Le critère de la diminution de la production d'eaux usées de 40% d'ici à 2030 n'est pas pris en compte dans cet exemple car on étudie le réseau de chaleur d'un méthaniseur.

Au final, l'énergie à redistribuer est de 9,72 GWh ce qui est légèrement inférieur à sa capacité d'origine. En effet, la quantité de déchets apportée par la population supplémentaire ne compense pas totalement la baisse due au changement de comportement au niveau de l'énergie à distribuer.

Résultats et Analyse:

Comparaison des caractéristiques du réseau de chaleur du méthaniseur C2 pour le scénario 0 et le scénario 5 :

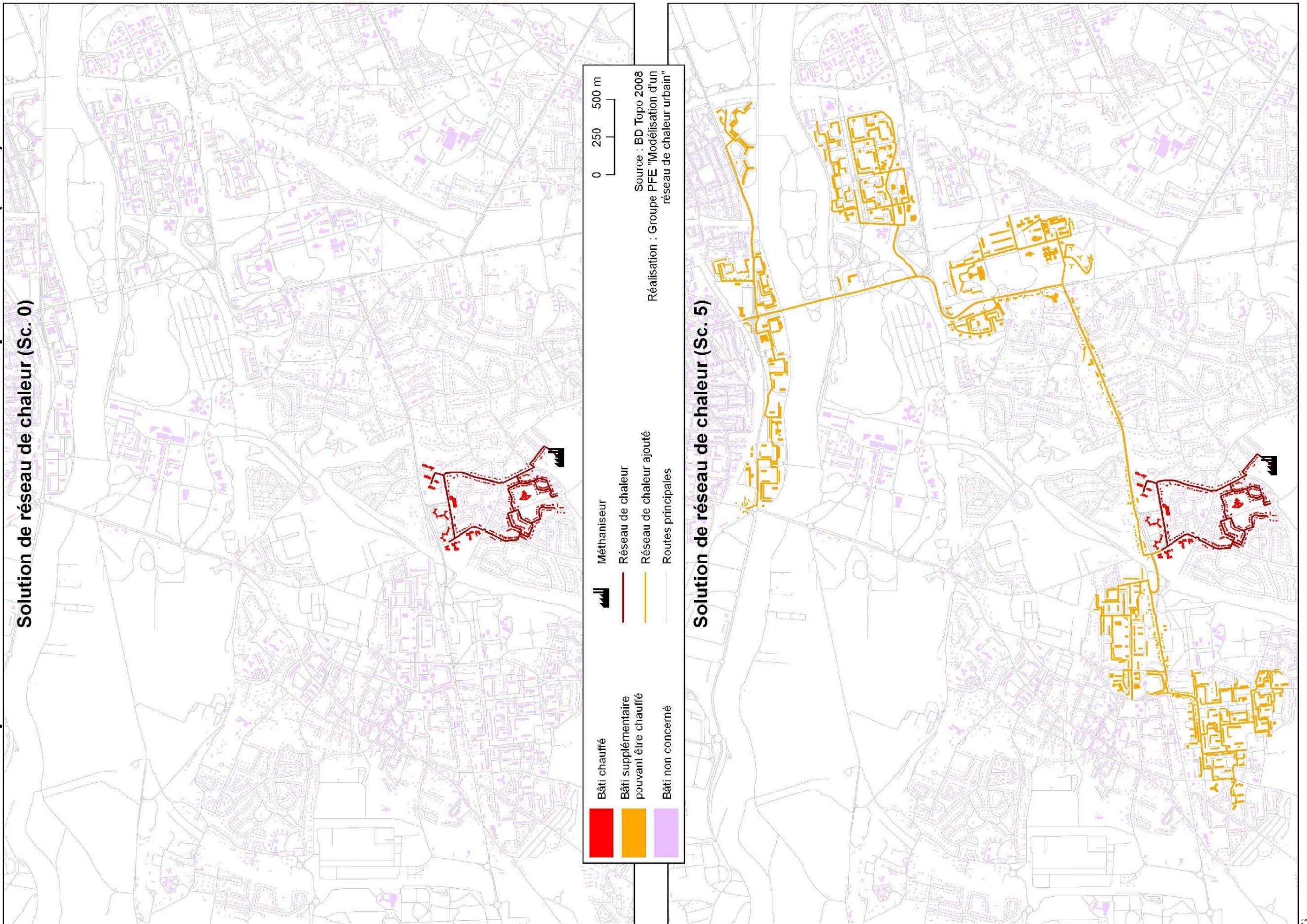
	Scénario 0	Scénario 5
Énergie à redistribuer (en MWh)	9807,65	9718,83
Longueur du réseau routier (en m)	3660	31485
Rentabilité du réseau (en MWh/m)	2,68	0,31
Population desservie (en nb d'hab)	1858	27948

Figure 79 : Tableau des caractéristiques du réseau de chaleur C2 pour les scénarios 0 et 5

Pour à peu près la même offre en énergie entre le scénario 0 et le scénario 5, on obtient un réseau de chaleur dont la longueur est près de neuf fois plus grande par rapport au scénario 0. Cet agrandissement du réseau se visualise sur la carte 35. Cela vient principalement du fait que la demande en énergie diminue considérablement lorsqu'on isole les bâtis. La rentabilité du réseau de chaleur du scénario 5 est par conséquent très faible (0,31 par rapport à 2,68 pour le scénario 0).

Malgré une densification du bâti au niveau du réseau de chaleur du scénario 0, le fait de très bien isoler les bâtiments augmente la longueur du réseau de chaleur de manière très importante et la rentabilité devient inférieure au seuil de 1,5MWh/m définie par l'Ademe. **Au sein du Noyau Urbain de Tours, on voit donc qu'un scénario avec une vision très positive du point de vue environnemental n'est pas du tout compatible avec un réseau de chaleur rentable du fait que la densité du tissu urbain ne soit pas suffisante. Dans un milieu urbain plus dense que Tours, les réseaux de chaleur pourront peut-être rester rentables.**

Application d'un scénario multi-critères optimal d'un point de vue environnemental à la parcelle C2 (Sc. 5)



Carte 35 : Application d'un scénario multicritères d'un point de vue environnemental pour la parcelle C2

b) Scénario 6 : Vision positive du point de vue environnemental sans isolation des parois opaques (sauf des bâtis que l'on densifie)

Le scénario précédent est la vision la plus positive au niveau de l'isolation. On peut alors faire un scénario 6 qui considère que l'on réalise un effort d'isolation seulement sur le vitrage mais pas spécialement sur les murs. On a vu que la demande en énergie augmentait de manière importante avec une isolation maximum des murs. Or cette isolation est physiquement difficile à mettre en place et très coûteuse. L'isolation au niveau du vitrage est par contre plus facile à mettre en place (remplacement du simple/double vitrage par du triple vitrage).

Ce scénario 6 permet donc de voir ce qui se passerait si on considère des efforts réalisables d'ici à 2030 :

- Une augmentation de la population de 0,12% par an par densification,
- Une diminution de la production de déchets de 3,8%,
- Une isolation des vitrages **de tous les bâtiments** avec $U_v = 1,1$
- Une isolation des parois opaques **seulement des bâtis que l'on densifie** avec $R_{th} = 2,2$
- Une diminution de la production d'eaux usées de 40%.

Résultats et Analyse:

Comparaison des caractéristiques du réseau de chaleur du méthaniseur C2 pour le scénario 0 et le scénario 6 :

	Scénario 0	Scénario 6
Énergie à redistribuer (en MWh)	9807,65	9716,75
Longueur du réseau routier (en m)	3660	6999,8
Rentabilité du réseau (en MWh/m)	2,68	1,38
Population desservie (en nb d'hab)	1858	4599

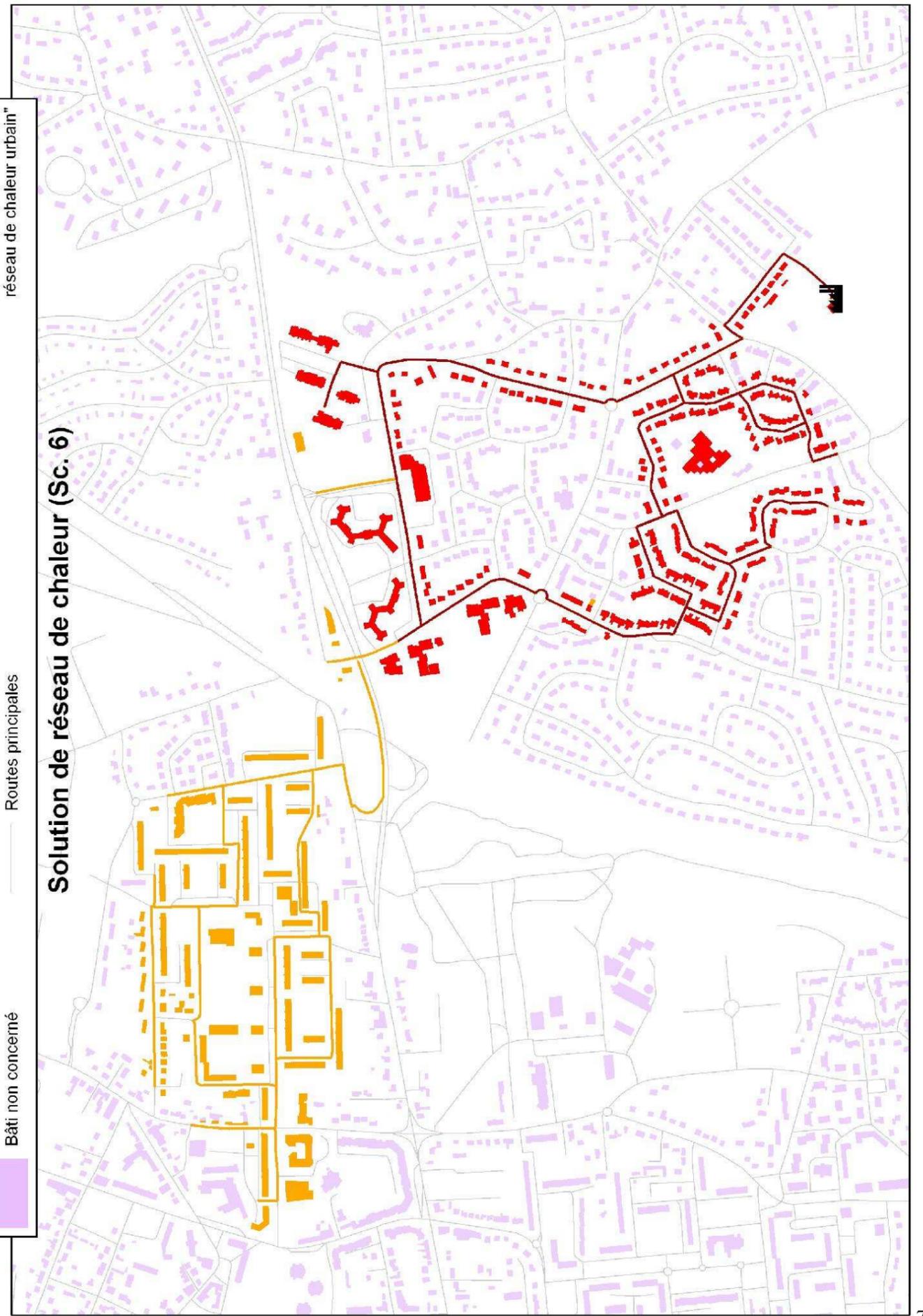
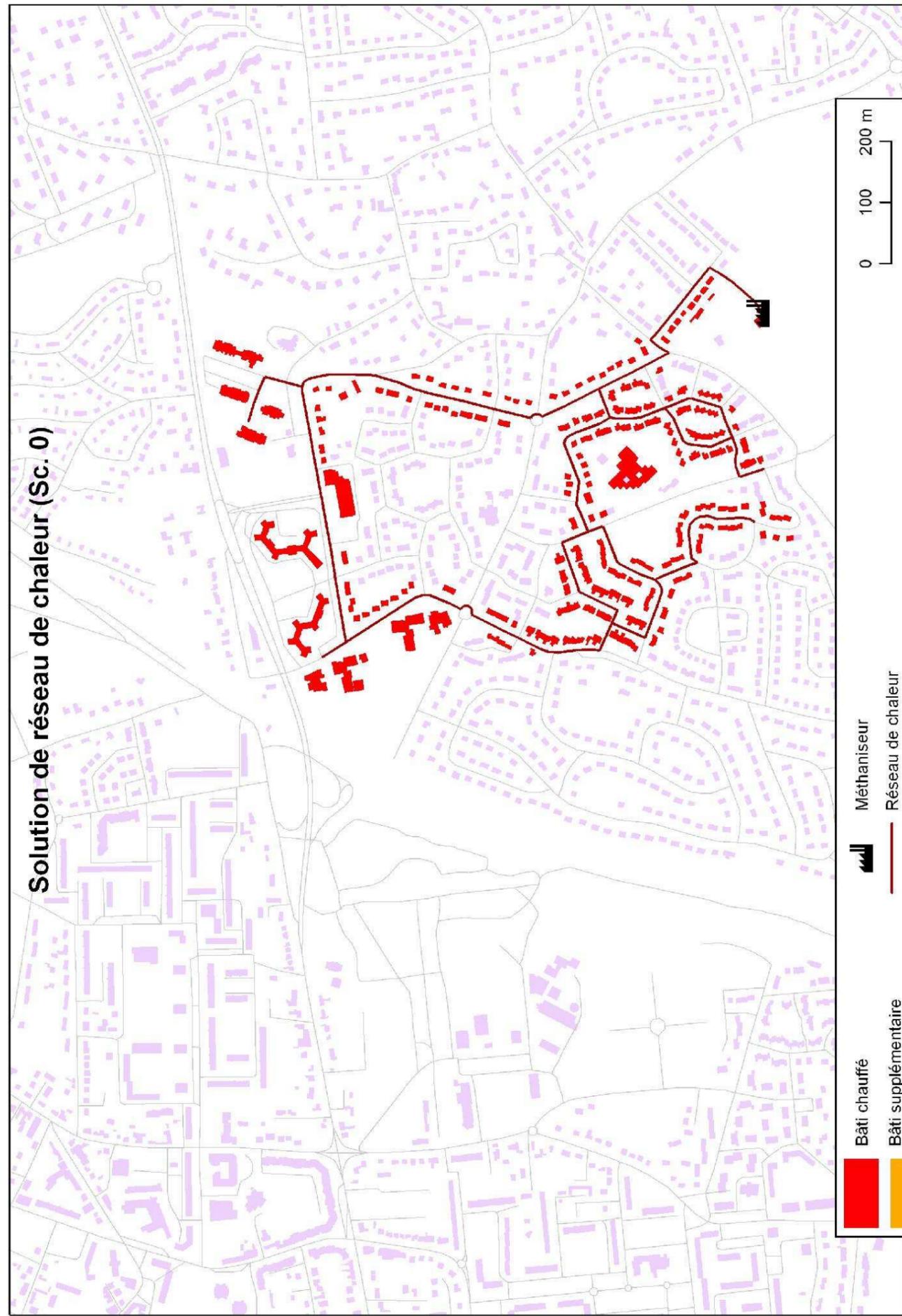
Figure 80: Tableau des caractéristiques du réseau de chaleur de C2 pour les scénarios 0 et 6

Illustré par la carte 36, le réseau de chaleur que l'on obtient est bien plus petit que celui du scénario 5 : il est seulement deux fois plus grand que le réseau de chaleur du scénario 0. La rentabilité du réseau est également divisée par deux. Le coefficient multiplicateur pour la rentabilité du réseau est environ de neuf pour passer du scénario 0 au scénario 5, alors que ce coefficient est de deux pour passer du scénario 0 au scénario 6. On voit donc que l'impact de l'isolation des bâtiments est très important.

De plus, la rentabilité du réseau de chaleur pour le scénario 6 passe juste en dessous du seuil de rentabilité de 1,5MWh/m définie par l'Ademe. Le fait de faire des efforts sur tous les paramètres sauf sur l'isolation des parois opaques entraîne la création d'un réseau de chaleur qui n'est plus rentable.

Ce scénario qui améliore seulement le vitrage et non les murs (sauf sur les bâtis densifiés) démontre qu'une vision positive du point de vue environnemental mais plus réaliste que le scénario 5, ne permet toujours pas de créer un réseau de chaleur rentable.

Application d'un scénario multi-critères à la parcelle C2 (Sc. 6)



 Bâti chauffé	 Méthaniseur
 Bâti supplémentaire pouvant être chauffé	 Réseau de chaleur
 Bâti non concerné	Réseau de chaleur ajouté
	Routes principales

2.3 Bilan des scénarios

Suite à la réalisation de nos scénarios nous avons pu constater l'influence de la modification de l'offre et de la demande ainsi que la combinaison des deux à l'horizon 2030.

La modification de l'offre, que nous avons scénarisée sous la forme de diminution des déchets et de diminution de la production d'eaux usées ont des répercussions différentes sur la rentabilité des réseaux de chaleur. En effet les déchets ne pouvant que peu diminuer, l'impact de cette diminution reste faible. Au contraire une baisse de la production d'eaux usées de 40% peut avoir des conséquences néfastes si le tissu urbain ne permet pas de réduire la longueur du réseau proportionnellement à la diminution de la production de chaleur.

La modification de la demande, que nous avons scénarisée sous la forme d'une meilleure isolation des bâtiments, permet de chauffer une population plus importante avec une même centrale de production, cependant la rentabilité des réseaux de chaleur diminue.

Cependant, dans la réalité, la rénovation du parc se fera progressivement et de façon disparate. La rentabilité des réseaux de chaleur va donc diminuer au fur et à mesure que les bâtiments qu'ils desservent ou desserviront amélioreront leur isolation. Cette baisse pourra être contenue uniquement si les tissus urbains se resserrent de façon importante : des densités comme on en rencontre sur le Noyau Urbain de Tours actuellement ne seront pas suffisantes.

Au final, des actions vertueuses au niveau de l'isolation du bâtiment sont en contradiction avec la recherche d'une bonne rentabilité pour un réseau de chaleur. Ainsi, d'un point de vue urbain, l'encouragement à l'isolation des bâtiments doit être accompagné d'un encouragement à la densification si l'on veut conserver une bonne rentabilité pour les réseaux de chaleur.

CONCLUSION

L'application de notre outil au Noyau Urbain de Tours et sur différents scénarios prospectifs nous a permis de tester et de valider notre modèle pour tout territoire similaire à notre cas d'étude. Les résultats obtenus ont montré qu'il était possible d'établir un outil de calcul des besoins en chauffage et de modélisation des réseaux de chaleur alimentés par la méthanisation, la récupération de chaleur des eaux usées et les chaudières bois. Cet outil permet de déterminer une organisation spatiale au sein de l'espace urbain pour chacune des techniques de production de chaleur étudiées.

De plus, cette application a permis de dégager des conclusions sur la typologie urbaine favorisant la rentabilité d'un réseau de chaleur. Ainsi, celle-ci sera d'autant plus importante que le tissu urbain sera dense. Un deuxième enseignement important concerne le paradoxe qui existe entre les actions menées pour le développement durable et la rentabilité du réseau de chaleur : une amélioration des leviers concernant la demande, comme l'isolation des parois, a un impact négatif sur cette rentabilité du fait de l'étalement de la demande. Pour limiter cet impact, la densification reste le seul moyen.

L'élaboration de l'outil a montré également qu'il n'était pas possible d'automatiser le processus dans sa globalité. En effet, si certains critères restent purement mathématiques, une réflexion propre à chaque cas d'étude portée par un urbaniste est indispensable pour mener à bien certaines parties de l'outil.

Par ailleurs, la potentialité de l'outil n'a pas été totalement utilisée puisqu'il serait par exemple possible d'évaluer le gain sur les émissions de CO₂ en chauffant le bâti par les trois techniques développées. Avec les besoins actuels, il serait de 2% environ pour la méthanisation et la récupération de chaleur des eaux usées puisque c'est la capacité combinée de ces techniques à répondre aux besoins en chauffage d'un espace urbain. L'utilisation du bois permettra aussi de diminuer les productions de CO₂ là où les réseaux seront installés. Ce gain sur les trois techniques augmentera si des efforts sont réalisés sur la demande en énergie des logements ; l'isolation des parois par exemple. Notre modèle montre qu'une isolation complète du parc de logements divisera par sept les besoins en chauffage, impliquant une division par sept des émissions en CO₂. Le facteur 4 serait alors atteint en ce qui concerne le chauffage des habitations. Cependant, cela se fera au détriment de la rentabilité des réseaux. Pour les garder rentables, il faudra donc utiliser d'autres technologies de productions durables en complément de celles proposées dans notre rapport. Notre outil pourra alors être adapté ce qui permettra de répéter la démarche pour ces autres techniques. De même, notre méthode concerne uniquement les besoins en chauffage, mais pourrait être transposée à d'autres postes de consommation d'un bâtiment, comme l'eau chaude sanitaire par exemple. L'étude de ces autres techniques et la transposition aux autres postes de consommation pourront faire l'objet de recherches supplémentaires.

Malgré tout, notre modèle reste une approche de la réalité et ne constitue pas une représentation fine de celle-ci. En effet, un modèle théorique comme celui créé ne prend pas en compte les jeux d'acteurs complexes existants dans toute mise en place d'un projet d'aménagement. Cependant, notre modèle reste un outil fort d'aide à la décision et un levier d'action important pour toutes les questions énergétiques relatives à l'espace urbain.

TABLE DES MATIERES

Avertissement.....	4
Formation par la recherche et projet de fin d'études.....	5
Remerciements.....	6
Sommaire.....	7
Introduction.....	9
Partie 1.....	14
Elaboration du modele theorique.....	14
1. Les reseaux de collecte et de distribution.....	15
1.1 Des graphes comme les autres.....	15
a) Definition du graphe.....	15
b) Le reseau de distribution et de collecte.....	15
1.2 Construction du reseau de collecte et de distribution pour un traitement par SIG.....	16
a) Le reseau viaire, un outil d'organisation territoriale.....	16
b) Les contraintes du reseau viaire sur un espace urbain.....	16
c) La connexion entre le bâti et le reseau.....	17
1.3 La simplification du reseau au regard de la specificite urbaine.....	18
a) Des matrices carrées pour la gestion du reseau.....	18
b) Le carrefour routier, une zone de distribution et de collecte justifiée.....	18
1.4 La topologie des reseaux.....	19
a) Reseau en bus.....	19
b) Reseau en étoile.....	20
c) Reseau en arbre.....	20
2. Estimation des besoins de chauffage à l'échelle urbaine : la demande en energie.....	21
2.1 Période de chauffe et degrés-heures.....	21
2.2 Les déperditions par l'enveloppe.....	22
2.3 Les déperditions par la ventilation.....	24
2.4 Les apports internes.....	25
2.5 Les apports solaires.....	25
2.6 Bilan.....	29
3. L'offre matière.....	30
3.1 L'offre bois.....	30
a) Les technologies.....	30
b) Les espaces urbains susceptibles d'abriter les centrales de production.....	31
i) Détermination des catégories de chaufferies.....	31
ii) Les critères.....	32
c) De l'installation des chaufferies à l'estimation des ressources nécessaires.....	34
3.2 Méthanisation.....	37
a) Généralités sur la méthanisation.....	37
i) Choix des déchets traités.....	37
ii) Production et valorisation du biogaz.....	38
b) Mise en place d'un modèle.....	38
i) Calcul du gisement de déchets d'un espace urbain donné et quantité de chaleur.....	38
ii) Mise en place de scénarios faisant varier la taille des unités.....	39
iii) Choix d'une localisation au sein d'un milieu urbain.....	39
iv) Détermination des zones de collecte de déchets et de distribution potentielle de la chaleur.....	40
3.3 Offre récupération de la chaleur des eaux usées :.....	41
a) Généralités sur la récupération de chaleur des eaux usées.....	41
b) Mise en place d'un modèle.....	42
i) Nécessité de modéliser le problème.....	42

ii) Mise en place de réservoirs au sein de l'espace urbain.....	43
iii) Choix d'une localisation au sein d'un milieu urbain pour ces unités de récupération de chaleur des eaux usées	44
iv) Détermination des zones de collecte d'eaux usées et de distribution potentielles de chaleur	45
4. Choix d'un indicateur de rentabilité des réseaux de distribution de chaleur	45
4.1 La densité thermique	45
4.2 Seuils de rentabilité	46
Partie 2.....	47
Mise en œuvre opérationnelle de l'outil.....	47
1. Les avantages d'une modélisation en SIG.....	48
1.1 L'utilisation d'un SIG dans une modélisation énergétique territorialisée	48
a) La définition d'un SIG	48
b) Quel logiciel de SIG choisir pour réaliser la modélisation?.....	49
c) A qui s'adresse ce guide méthodologique cartographique?	49
d) Quelles sont les limites de ce guide méthodologique cartographique?.....	50
1.2 La production et la représentation des données par une modélisation sous SIG	51
a) L'articulation de la modélisation des données sous SIG dans le projet	51
b) Les objectifs de la modélisation sous SIG	51
2. La structuration de la base de données spatialisée	52
2.1 Objectifs de la partie.....	52
2.2 Base de données répondant à la question de la demande en énergie.....	53
a) Quelles données et contraintes souhaite-t-on?	53
b) Fabrication de la typologie des bâtis par étape	55
c) Architecture de la fabrication de la typologie du bâti	60
2.3 Base de données répondant à la question de l'offre en énergie.....	62
a) Quelles données/contraintes souhaite-t-on?	62
b) Fabrication de la typologie des parcelles par étape:.....	64
c) Architecture de la fabrication de la typologie des parcelles.....	69
2.4 Vers une automatisation de la production cartographique ?.....	71
2.5 Conclusion.....	71
3. Le réseau de distribution et de collecte des déchets	72
3.1 Création de la matrice des chemins minimaux	72
3.2 Méthode de simplification pour la distribution de chaleur et la collecte des déchets et des eaux usées.....	74
4. Le modèle de reconstitution de la demande	76
5. Le modèle relatif à l'offre énergétique	78
5.1 L'offre bois.....	78
a) Sélection des parcelles contenant les centrales	78
b) Estimation des ressources en bois nécessaires pour répondre à la demande.....	80
5.2 L'offre méthanisation	81
a) Les programmes utilisés.....	81
b) Méthode pour déterminer lequel des scénarios minimise les distances à parcourir pour collecter les déchets.....	83
5.3 L'offre récupération chaleur des eaux usées	84
6. La rentabilité du réseau	86
6.1 Rentabilité globale sur SIG	86
6.2 Rentabilité locale à l'aide d'un outil de calcul matriciel.....	87
Partie 3.....	88
Application à un cas d'étude et scénarios prospectifs : le Noyau Urbain de Tours	88
1. Le contexte de la demande énergétique du Noyau Urbain de Tours.....	90
1.1 Le parc de logement	90
a) Le nombre de logements individuels et collectifs par période de construction	91
b) La répartition du bâti par période de construction et par IRIS.....	93
c) Le plan d'épannelage.....	94

1.2 La construction du réseau de distribution et de collecte.....	96
a) Les contraintes géographiques et urbaines	96
i) La Loire et le Cher	96
ii) Le réseau ferré	97
iii) L' autoroute A10 et le périphérique.....	98
b) La construction du réseau.....	98
c) La simplification du réseau	99
1.3 Les besoins d'énergie : application au cas du Noyau Urbain de Tours.....	99
a) Paramètres utilisés pour calculer les besoins en chauffage	99
b) Résultats	99
1.4 L' offre bois.....	103
a) La ressource bois en Indre-et-Loire.....	103
b) Détermination des espaces urbains pour l' installation des chaufferies	103
c) Détermination des zones de distribution potentielles.....	108
1.5 L' offre méthanisation	112
a) Détermination du gisement en déchets du Noyau Urbain de Tours	112
b) Choix des scénarios pour la méthanisation	113
c) Détermination des espaces urbains pouvant accueillir des unités de méthanisation.....	114
i) Cas du scénario à une unité de méthanisation.....	114
ii) Cas du scénario à deux unités de méthanisation	116
iii) Cas du scénario à quatre unités de méthanisation.....	118
iv) Bilan de l'insertion des unités de méthanisation au sein du Noyau Urbain de Tours.....	120
d) Détermination du scénario optimal pour collecter les déchets.....	120
i) Description et analyse des zones de collecte pour chaque scénario.....	120
ii) Détermination du scénario minimisant les déplacements pour collecter les déchets.....	125
e) Détermination des zones de distribution de chaleur potentielles	126
1.6 L' offre eaux usées	131
a) Détermination du nombre de réservoirs à implanter	131
b) Détermination des espaces urbains pouvant accueillir des unités de récupération de chaleur des eaux usées	131
c) Détermination des zones de collecte des eaux usées.....	134
d) Détermination des zones de distribution de chaleur potentielles	137
e) Bilan du potentiel de la méthanisation et de la récupération de chaleur des eaux usées.....	139
1.7 Mise en place des réseaux de chaleur.....	140
a) Création des réseaux de distribution de chaleur	140
i) Choix des réseaux traités.....	140
ii) Création des réseaux	140
b) Analyse des résultats obtenus pour le Noyau Urbain de Tours.....	146
1.8 Mise en place d'indicateurs de comparaison des scénarios.....	147
2. Scénarios et perspectives.....	148
2.1 Modification d' un seul paramètre	149
a) Modification de l' offre	149
i) Scénario 1 : diminution des déchets.....	149
ii) Scénario 2 : diminution des eaux usées	153
b) Modification de la demande.....	157
i) Scénario 3 : Amélioration du vitrage	157
ii) Scénario 4 : Amélioration des parois opaques	161
2.2 Scénarios combinés	164
a) Scénario 5 : vision positive du point de vue environnemental.....	164
b) Scénario 6 : Vision positive du point de vue environnemental sans isolation des parois opaques (sauf des bâtis que l' on densifie).....	168
2.3 Bilan des scénarios	171
Conclusion.....	172

Table des matières	174
Bibliographie	178
Table des figures	180
Table des Cartes	184
Annexes	186

BIBLIOGRAPHIE

Webographie

Ademe : www.ademe.fr

Biomasse Normandie : www.biomasse-normandie.org

Centre d'Etudes Techniques et de l'Équipement de l'Ouest : www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr

CRPF : www.crfp.fr

Ecologs : www.ecologs.org

ESRI : www.esri.com

Legifrance : www.legifrance.fr

Observatoire Régional des déchets d'Ile de France : www.ordif.com

Blog sur les réseaux de chaleur : reseauxchaleur.wordpress.com

Livres, rapports, articles

ADDOU A. (2009), *Traitement des déchets, valorisation élimination*, ELLISPES, 284p.

ADEME Bureau d'étude TRIVALOR (Novembre 2001), *Etude de valorisation des cendres de chaufferies bois* - 92p.

ADEME Critt Bois –Fibois (2002) *Validation des méthodes de mesures des caractéristiques des combustibles bois déchiquetés*, 62p.

ADEME délégation régionale de Franche Comté et Conseil régional de la Haute-Saône (2002) *Chaufferie au bois et réseau de chaleur*, plaquette.

ADEME (1999), *URE Batiment : Guide d'audit énergétique*, chap 6 chauffage, 52p.

AGENCE LOCALE DE L'ENERGIE DE L'AGGLOMERATION LYONNAISE (2006), *Le chauffage collectif au bois : une solution innovante et compétitive*, plaquette.

AGENCE LOCALE DE L'ENERGIE DE L'AGGLOMERATION LYONNAISE (2008), *Chaufferie collective automatique au bois – logement sociaux du groupe allié*, Les fiches d'exemples de l'agglomération lyonnaise.

ATELIER PARISIEN D'URBANISME (2006), *Les Réseaux de chaleur à Paris et en petite couronne*, 20 p.

ATELIER PARISIEN D'URBANISME (2007), *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*.

AXENNE (2008), *Le Bois énergie, usages individuelles et collectifs*, Conseil Général des Landes, 26 p.

BENETTO E., POPOVICI E., ROUSSEAU P (2002), *Le recyclage des cendres de bois en forêt*, Bois énergie n°6, pp.46-47

- BIOMASSE NORMANDIE (Novembre 2005), *Les cendres de chaufferies bois, Rapport final*, 64p.
- BIOMASSE NORMANDIE (2008) *La chaufferie bois du réseau de chauffage urbain de Hauteville : une opération bois-énergie d'envergure nationale*, plaquette.
- BOURSE DES TRAVAUX FORESTIERS DU CENTRE(2006), *Où trouver votre bois de chauffage ?*, 7p.
- CHAMBRE DE COMMERCE ET D'INDUSTRIE DE LA LOZERE (2005) *Mission de promotion du bois-énergie en Lozère et dans le Gard chauffage automatique à bois pour une habitation collective*, plaquette.
- CIBE (2008), *Les réseaux de chaleur au bois*, 28p.
- CENTOFANTI C. (2010), *Biomasse : le quartier de La Source se chauffera au bois en 2012!* - la Tribune d'Orléans n°155 pp.4
- DRESLER H. (2000), District Heating, an objective choice, *Hors-série / Special issue Bois/ Holz Energie*, pp. 41-42.
- ETUDIANTS CESA(2007) *Quelles potentialités pour le développement des énergies issues de la biomasse ?* 105p.
- GASC A., PIENIEK AGATA, REVILLET E., PFE (2009-2010): *les Systèmes d'Information Géographique (SIG), quels impacts dans les pratiques d'aménagement du territoire ?*, 131p.
- LEURENT F. (2006), *Structures de réseau et modèles de cheminement*, Paris, Lavoisier TEC&DOC, 394 p.
- MAIZIA M. (2002), « Modélisation et systèmes urbains : une construction difficile », in *Outils de simulations dans le bâtiment et le génie urbain : vers une approche intégrée ?*, 10 p.
- MAIZIA M. (2007), "Huff's model and theory of graphs applies to renewable energy mutualisation", in *Renewables in a Changing Climate-Innovation in the Built Environment*, Proceedings of the International Conference CISBAT 2007, Lausanne, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 4-5 September 2007, pp. 547-552
- PEKALSKA E. (2001), *Introduction to Matlab*, 70 p.
- PREVOT H. (2006), *Les Réseaux de chaleur*, Ministère de l'Economie, des finances et de l'industrie, 109 p.
- RAUX C., TRAISNEL J.-P., NICOLAS J.-P., MAIZIA M., DELVERT K. (2005), *Bilans énergétiques Transport-Habitat et méthodologie BETEL*. ETHEL. Rapport R2. Action Concertée
- CNRS – Ministère de la Recherche. LET, Lyon.
- SUISSE ENERGIE. (2006) *Chauffer et rafraîchir grâce aux eaux usées, Guide pour les maîtres d'ouvrage et les communes* 36 p.
- SUEZ. (2009), *Récupération de la chaleur dans les réseaux d'assainissement* Présentation power point.

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Relation nœuds et arcs dans un graphe	15
Figure 2: Organisation du réseau, principe de collecte et de distribution	17
Figure 3: Principe de simplification du réseau	19
Figure 4: Réseau en bus.....	19
Figure 5: Réseau en étoile	20
Figure 6: Réseau en arbre.....	20
Figure 7: Illustration des Degrés-Heures.....	22
Figure 8: Tableau des caractéristiques du bâti	24
Figure 9: Application "Info Recepteur Solaire"	26
Figure 10: Application "Ecrans Solaire"	27
Figure 11: Effet de masque selon l'orientation.....	28
Figure 12: Vue de profil d'une chaufferie à Scey-sur-Saône (Source : Ademe)	30
Figure 13: Principales caractéristiques de chaufferies bois existantes	32
Figure 14: Catégories de parcelles	32
Figure 15: Schématisation de la modification des critères de surface.....	33
Figure 16: Modification des critères de surfaces.....	34
Figure 17 : Tableau des PCI en fonction de l'humidité (Source : ADEME).....	35
Figure 18: Illustration du critère de distance à la plus proche habitation.....	40
Figure 19: Fonctionnement d'une unité de récupération de chaleur des eaux usées (Source : Lyonnaise des Eaux).....	41
Figure 20: Schéma d'articulation du travail au niveau de la partie production de données sous SIG	51
Figure 21: Tableau des données nécessaires pour la typologie du bâti	54
Figure 22: Tableau montrant les différentes données utilisées, issues de bases de données.....	55
Figure 23: Tableau montrant les relations entre les variables des bases de données aux échelles communales et à l'IRIS	58
Figure 24: Tableau montrant un exemple des pourcentages corrigés à l'échelle de	

l'IRIS.....	59
Figure 25: Tableau montrant les rendements associés à chaque combinaison type de chauffage/type de combustible.....	59
Figure 26: Tableau montrant les rendements associés à chaque combinaison type de chauffage/type de combustible.....	60
Figure 27: Schamé de l'architecture de la fabrication de la typologie du bâti.....	61
Figure 28: tableau des données nécessaires pour la typologie du bâti	63
Figure 29: Tableau montrant les différentes données utilisées, issues des bases de données ci-dessus	64
Figure 30: Exemple de la sélection des parcelles cadastrales non bâties	65
Figure 31: Tableau sur la nature des tronçons du réseau routier.....	66
Figure 32: Exemple de la sélection des parcelles cadastrales non bâties et sans routes importantes les traversant.....	66
Figure 33: Exemple de la sélection des parcelles cadastrales non bâties, sans routes importantes les traversant et après remembrement	67
Figure 34: Tableau de la signification des différents zonages PLU	68
Figure 35: Exemple de toutes les informations que l'on obtient pour la parcelle 5688 du Noyau urbain de Tours	69
Figure 36: Schéma de l'architecture de la fabrication de la typologie des parcelles	70
Figure 37: Construction de la matrice des chemins minimaux avec un logiciel de SIG	72
Figure 38: Paramétrage du logiciel pour la construction du réseau: unité et sens des arcs	73
Figure 39: Exemple de sélection d'origine et de destination pour la construction de la matrice des chemins minimaux	73
Figure 40: Illustration du diagramme de Voronoï.....	74
Figure 41: Illustration de l'attribution des centroïdes au bâti	75
Figure 42: Illustration de l'accrochage des centroïdes au réseau.....	75
Figure 44 : Extrait du tableau d'entrée des données	76
Figure 43 : Schéma opérationnel du calcul des besoins	76
Figure 45 : Courbe des apports solaires sur une année.....	77
Figure 46 : Schéma de la sélection des parcelles et création des zones de distribution potentielle.....	79

Figure 47 : Détermination de la ressource en bois nécessaire à partir de la demande en énergie	80
Figure 48 : Schéma opérationnel pour la méthanisation	82
Figure 49 : Schéma opérationnel pour la récupération de chaleur des eaux usées.....	85
Figure 50 : Schéma opérationnel pour la rentabilité globale du réseau.....	86
Figure 51: Schéma opérationnel pour la rentabilité locale du réseau.....	87
Figure 52 : Tableau de la structure des communes appartenant au Noyau Urbain de Tours.....	89
Figure 53 : Histogrammes du nombre de logements par période de construction par commune du NUT	91
Figure 54 : Pourcentage des immeubles collectifs/maisons individuelles par commune	92
Figure 55: Exemple d'une distance réseau tenant compte d'une barrière géographique, la Loire	96
Figure 57 : Exemple d'une distance réseau tenant compte d'une barrière urbaine, le réseau ferré	97
Figure 56 : Exemple d'une distance réseau ne tenant pas compte d'une barrière géographique, la Loire.....	97
Figure 58: Exemple d'une distance réseau ne tenant pas compte d'une barrière urbaine, le réseau ferré	98
Figure 59: Tableaux détaillés des besoins par poste.....	102
Figure 60: Visualisation aérienne des 5 parcelles choisies pour l'installation des complexes de chaudières bois.	107
Figure 61 : Les caractéristiques des zones de distribution potentielles.....	108
Figure 62 : Composition des ordures ménagères.....	112
Figure 63 : Visualisation aérienne de la parcelle de l'usine.....	114
Figure 64 : Visualisation aérienne des 2 parcelles pour les 2 usines.....	116
Figure 65 : Visualisation aérienne des 4 parcelles pour les 4 usines.....	118
Figure 66 : Répartition des bâtiments en fonction de la distance à l'usine.....	124
Figure 67 : Evolution des distances cumulées en fonction des scénarios	125
Figure 68 : Caractéristiques des zones de distribution potentielles de chaleur pour la méthanisation.....	130
Figure 69 : Visualisation aérienne des 9 parcelles utilisées pour installer les unités de	

récupération de chaleur des eaux usées	133
Figure 70 : Evolution des zones de collectes d'eaux usées.....	134
Figure 71 : Caractéristiques des zones de distribution potentielles de chaleur pour les eaux usées.....	139
Figure 72 : Impact de la création du réseau sur la zone desservie.....	146
Figure 73 : Correspondances réseau de chaleur et scénarios.....	148
Figure 74: Tableau des caractéristiques des réseaux de chaleur C1 et C2 pour les scénarios 0 et 1	149
Figure 75 : Tableau des caractéristiques des réseaux de chaleur E4 et E8 pour les scénarios 0 et 2	153
Figure 76: Tableau des caractéristiques des réseaux de chaleur A4 et C1 pour les scénarios 0 et 3	157
Figure 77: Tableau des caractéristiques du réseau de chaleur C1 pour les scénarios 0 et 4.....	161
Figure 78 : Schéma de la méthode de densification utilisée.....	164
Figure 79 : Tableau des caractéristiques du réseau de chaleur C2 pour les scénarios 0 et 5	166
Figure 80:Tableau des caractéristiques du réseau de chaleur de C2 pour les scénarios 0 et 6	168

TABLE DES CARTES

Carte 1 : Insertion du Noyau Urbain de Tours au sein du périmètre du SCoT de l'Agglomération Tourangelle.....	90
Carte 2: Répartition par date de construction du parc de logement pour chaque IRIS du Noyau Urbain de Tours	93
Carte 3 : Plan d'épannelage des bâtis du Noyau Urbain de Tours.....	95
Carte 4: Besoins annuels de chauffage pour les bâtiments du Noyau Urbain de Tours	100
Carte 5 : Différents postes pris en compte pour estimer les besoins sur le Noyau Urbain de Tours.....	101
Carte 6 : Les principaux massifs forestiers d'Indre-et-Loire (<i>source : DDAF 37</i>).....	103
Carte 7 : Parcelles éligibles pour les chaufferies bois avant la sélection à dire d'expert	104
Carte 8 : Les parcelles sélectionnées pour l'installation des complexes de chaudières	106
Carte 9 : Espaces urbains potentiellement alimentés en énergie par les chaufferies bois	111
Carte 10 : Parcelles éligibles pour le scénario 1 usine de méthanisation, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours	115
Carte 11 : Parcelles éligibles pour le scénario 2 usines de méthanisation, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours	117
Carte 12 : Parcelles éligibles pour le scénario 4 usines de méthanisation, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours	119
Carte 13 : Zone de collecte du méthaniseur avec des isodistances (cas d'une usine).121	
Carte 14 : Zones de collecte des méthaniseurs (cas de 2 usines).....	122
Carte 15 : Zones de collecte des méthaniseurs (cas de 4 usines).....	123
Carte 16 : Zone de collecte du méthaniseur et zone de distribution potentielle (cas d'une usine).....	127
Carte 17 : Zones de collecte des méthaniseurs et zones de distribution potentielles de l'énergie (cas de 2 usines).....	128
Carte 18 : Zones de collecte des méthaniseurs et zones de distribution potentielles de l'énergie (cas de 4 usines)	129
Carte 19 : Parcelles éligibles pour la récupération de la chaleur des eaux usées, à l'échelle du Noyau Urbain de Tours	132
Carte 20 : Zones de collecte pour alimenter les récupérateurs de chaleur des eaux usées, définies par le logiciel de calcul matriciel	135
Carte 21 : Zones de collecte pour alimenter les récupérateurs de chaleur des eaux usées	136
Carte 22 : Zones de collecte des eaux usées et zones de distribution potentielles de l'énergie depuis les récupérateurs de chaleur des eaux usées	138
Carte 23 : Zone de distribution potentielle et solution de réseau de chaleur pour la parcelle A4	141
Carte 24 : Zone de distribution potentielle et solution de réseau de chaleur pour la parcelle C1.....	142
Carte 25 : Zone de distribution potentielle pour la parcelle CS2	143

Carte 26 : Zone de distribution potentielle et solution de réseau de chaleur pour la parcelle E4.....	144
Carte 27 : Zone de distribution potentielle et solution de réseau de chaleur pour la parcelle E8.....	145
Carte 28 : Conséquences pour la parcelle C1 d'une diminution de 3,8% des déchets (Sc. 1)	151
Carte 29 : Conséquences pour la parcelle C2 d'une diminution de 3,8% des déchets (Sc. 1)	152
Carte 30: Conséquences pour la parcelle E4 d'une diminution de 40% du volume d'eaux usées (Sc. 2).....	155
Carte 31: Conséquences pour la parcelle E8 d'une diminution de 40% du volume d'eaux usées (Sc. 2).....	156
Carte 32: Conséquences pour la parcelle A4 d'une amélioration des vitrages (Sc. 3)	159
Carte 33 : Conséquences pour la parcelle C1 d'une amélioration des vitrages (Sc. 3)	160
Carte 34: Conséquences pour la parcelle C1 d'une isolation des parois (Sc. 4)	163
Carte 35 : Application d'un scénario multicritères d'un point de vue environnemental pour la parcelle C2	167
Carte 36 : Application d'un scénario multicritères d'un point de vue environnemental sans isolation des parois à la parcelle C2	170

ANNEXES

1. Programme 1: Calcul des besoins

```
data=xlsread('data_final.xls');%id,surf,périm. ext.,hauteur,nb
étage, surface totale, pop. dans le bâti, coeff. 1-7, coeff 1-7
a=size(data);%taille lignes-colonnes du fichier data.xls
importé
a=a(1,1);%on garde le nbre de lignes
b=zeros(a,12);% matrice de 0 faisait le nbre de lignes de data
& 10 col.

%Déperditions par l'enveloppe (opaque+vitres)
%<49 49-74 75-81 82-89 90-98 99-05 06-08

param=[1/1.6 1/1.4 1/1.2 1 1/0.9 1/0.75 1/0.45; 4.95 4.95 4.5 4
2.8 1.2 1.1; 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.2 0.2];
%param=[1/1.6 1/1.4 1/1.2 1 1/0.9 1/0.75 1/0.45; 1.1 1.1 1.1
1.1 1.1 1.1 1.1; 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.2 0.2];
%param=[1/0.45 1/0.45 1/0.45 1/0.45 1/0.45 1/0.45 1/0.45; 4.95
4.95 4.5 4 3 1.2 1.1; 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.2 0.2];
%param=[1/0.45 1/0.45 1/0.45 1/0.45 1/0.45 1/0.45 1/0.45; 1.1
1.1 1.1 1.1 1.1 1.1; 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.2 0.2];

for i=1:a

b(i,1)=param(1,1)*data(i,8)+param(1,2)*data(i,9)+param(1,3)*dat
a(i,10)+param(1,4)*data(i,11)+param(1,5)*data(i,12)+param(1,6)*
data(i,13)+param(1,7)*data(i,14);%somme(e/lambda)

b(i,2)=param(2,1)*data(i,8)+param(2,2)*data(i,9)+param(2,3)*dat
a(i,10)+param(2,4)*data(i,11)+param(2,5)*data(i,12)+param(2,6)*
data(i,13)+param(2,7)*data(i,14);%Uv

b(i,3)=param(3,1)*data(i,8)+param(3,2)*data(i,9)+param(3,3)*dat
a(i,10)+param(3,4)*data(i,11)+param(3,5)*data(i,12)+param(3,6)*
data(i,13)+param(3,7)*data(i,14);%tx vitrage
end

for i=1:a%calcul des déperditions pr chaque bâtiment
    b(i,4)=(data(i,3)*data(i,4)*(1-
b(i,3))*66391/(0.17+b(i,1)))+(data(i,2)*66391)/(0.14+b(i,1));%d
ép. opaques Hyp: toi plat
    b(i,5)=data(i,3)*data(i,4)*b(i,3)*66391*b(i,2);%dép. vitres
    b(i,6)=b(i,4)+b(i,5);%dép. totales (b4+b5)
end
%Fin déperditions par l'enveloppe (opaque+vitres)

%Déperditions par la ventilation
for i=1:a
    b(i,7)=0.34*18*data(i,7)*66391;
end
%Fin déperditions par la ventilation

%Apports internes
for i=1:a
    b(i,8)=4*data(i,6)*5760;%4W/M² Valeur RT2000
end
%Fin apports internes

%Apports solaires
```

```

tours_as=100000*[7.8491  7.7727  7.5846  7.2005  6.5836  5.7880
4.8251  3.8784  2.8867  1.9902  1.2041  0.6573  0.4948];%valeurs
trouvées avec solaire.m
tours_masque=[0.2190  0.3032  0.2686  0.2698  0.2670  0.2530  0.2291
0.2058  0.1707  0.1209  0.1015  0.0744  0.0198];%valeurs trouvées
avec masque.m
tours_masque=1-tours_masque;
tours_as=tours_as .* tours_masque;
tours_as=tours_as*0.85*0.42;
%Je prend 1/13 du vitrage de chaque bâtiment pour chaque
orientation

for i=1:a
    b(i,9)=sum((data(i,3)*data(i,4)*b(i,3))/13*tours_as);
end

%Fin apports solaires

for i=1:a%calcul des besoins
    b(i,10)=(b(i,6)+b(i,7))-(b(i,8)+b(i,9));
end

for i=1:a%calcul des besoins en kwh/m²
    b(i,11)=b(i,10)/(1000*data(i,6));
end

for i=1:a%recopiage de la colonne ID
    b(i,12)=data(i,1);
end

xlswrite('besoins_temp',b);%écriture des résultats dans le
fichier excel

```

1.1 Programme 1.1: Calcul du masque

```
heures=zeros(24,5);
heures(1,1:5)=[1 1897 4105 6313 8737];

for i=2:24
    for j=1:5
        heures(i,j)=heures(i-1,j)+1;
    end
end

x{24}=heures(1,1:end);
x{1}=heures(2,1:end);
x{2}=heures(3,1:end);
x{3}=heures(4,1:end);
x{4}=heures(5,1:end);
x{5}=heures(6,1:end);
x{6}=heures(7,1:end);
x{7}=heures(8,1:end);
x{8}=heures(9,1:end);
x{9}=heures(10,1:end);
x{10}=heures(11,1:end);
x{11}=heures(12,1:end);
x{12}=heures(13,1:end);
x{13}=heures(14,1:end);
x{14}=heures(15,1:end);
x{15}=heures(16,1:end);
x{16}=heures(17,1:end);
x{17}=heures(18,1:end);
x{18}=heures(19,1:end);
x{19}=heures(20,1:end);
x{20}=heures(21,1:end);
x{21}=heures(22,1:end);
x{22}=heures(23,1:end);
x{23}=heures(24,1:end);

%Données pour chaque orientation

sud{24}=[0 0 0 0 0];
sud{1}=[0 0 0 0 0];
sud{2}=[0 0 0 0 0];
sud{3}=[0 0 0 0 0];
sud{4}=[0 0 0 0 0];
sud{5}=[0 0 0 0 0];
sud{6}=[0 0 0 0 0];
sud{7}=[7 0 3 0 7];
sud{8}=[8 0 6 97 8];
sud{9}=[8 0 6 80 8];
sud{10}=[8 0 6 71 8];
sud{11}=[8 0 7 66 8];
sud{12}=[8 0 7 65 8];
sud{13}=[8 0 7 66 8];
sud{14}=[8 0 6 71 8];
sud{15}=[8 0 6 80 8];
sud{16}=[8 0 6 97 8];
sud{17}=[7 0 3 0 7];
sud{18}=[0 0 0 0 0];
sud{19}=[0 0 0 0 0];
```

```

sud{20}=[0 0 0 0 0];
sud{21}=[0 0 0 0 0];
sud{22}=[0 0 0 0 0];
sud{23}=[0 0 0 0 0];

quinze{24}=[0 0 0 0 0];
quinze{1}=[0 0 0 0 0];
quinze{2}=[0 0 0 0 0];
quinze{3}=[0 0 0 0 0];
quinze{4}=[0 0 0 0 0];
quinze{5}=[0 0 0 0 0];
quinze{6}=[0 0 0 0 0];
quinze{7}=[0 0 0 0 0];
quinze{8}=[0 0 0 95 0];
quinze{9}=[0 0 0 73 0];
quinze{10}=[0 0 0 65 0];
quinze{11}=[0 0 0 63 0];
quinze{12}=[0 0 3 64 0];
quinze{13}=[12 0 12 67 12];
quinze{14}=[26 0 20 74 26];
quinze{15}=[40 0 29 83 40];
quinze{16}=[54 0 40 97 54];
quinze{17}=[72 0 58 0 72];
quinze{18}=[100 0 98 0 100];
quinze{19}=[0 0 0 0 0];
quinze{20}=[0 0 0 0 0];
quinze{21}=[0 0 0 0 0];
quinze{22}=[0 0 0 0 0];
quinze{23}=[0 0 0 0 0];

trente{24}=[0 0 0 0 0];
trente{1}=[0 0 0 0 0];
trente{2}=[0 0 0 0 0];
trente{3}=[0 0 0 0 0];
trente{4}=[0 0 0 0 0];
trente{5}=[0 0 0 0 0];
trente{6}=[0 0 0 0 0];
trente{7}=[0 0 0 0 0];
trente{8}=[0 0 0 0 0];
trente{9}=[0 0 0 55 0];
trente{10}=[0 0 0 52 0];
trente{11}=[0 0 0 55 0];
trente{12}=[0 0 0 60 0];
trente{13}=[12 0 11 66 12];
trente{14}=[26 0 26 74 26];
trente{15}=[40 0 39 85 40];
trente{16}=[54 0 54 98 54];
trente{17}=[72 0 72 0 72];
trente{18}=[100 0 99 0 100];
trente{19}=[0 0 0 0 0];
trente{20}=[0 0 0 0 0];
trente{21}=[0 0 0 0 0];
trente{22}=[0 0 0 0 0];
trente{23}=[0 0 0 0 0];

qcing{24}=[0 0 0 0 0];
qcing{1}=[0 0 0 0 0];
qcing{2}=[0 0 0 0 0];
qcing{3}=[0 0 0 0 0];
qcing{4}=[0 0 0 0 0];
qcing{5}=[0 0 0 0 0];
qcing{6}=[0 0 0 0 0];
qcing{7}=[0 0 0 0 0];

```

```

qcinq{8}=[0 0 0 0 0];
qcinq{9}=[0 0 0 0 0];
qcinq{10}=[0 0 0 13 0];
qcinq{11}=[0 0 0 36 0];
qcinq{12}=[0 0 0 51 0];
qcinq{13}=[4 0 3 62 4];
qcinq{14}=[27 0 26 73 27];
qcinq{15}=[44 0 44 85 44];
qcinq{16}=[61 0 60 98 61];
qcinq{17}=[78 18 78 0 78];
qcinq{18}=[100 35 99 0 100];
qcinq{19}=[0 57 0 0 0];
qcinq{20}=[0 0 0 0 0];
qcinq{21}=[0 0 0 0 0];
qcinq{22}=[0 0 0 0 0];
qcinq{23}=[0 0 0 0 0];

soix{24}=[0 0 0 0 0];
soix{1}=[0 0 0 0 0];
soix{2}=[0 0 0 0 0];
soix{3}=[0 0 0 0 0];
soix{4}=[0 0 0 0 0];
soix{5}=[0 0 0 0 0];
soix{6}=[0 0 0 0 0];
soix{7}=[0 0 0 0 0];
soix{8}=[0 0 0 0 0];
soix{9}=[0 0 0 0 0];
soix{10}=[0 0 0 0 0];
soix{11}=[0 0 0 0 0];
soix{12}=[0 0 0 30 0];
soix{13}=[0 0 0 54 0];
soix{14}=[22 0 21 70 22];
soix{15}=[45 0 44 84 45];
soix{16}=[63 16 63 98 63];
soix{17}=[81 36 80 0 81];
soix{18}=[100 55 99 0 100];
soix{19}=[0 75 0 0 0];
soix{20}=[0 0 0 0 0];
soix{21}=[0 0 0 0 0];
soix{22}=[0 0 0 0 0];
soix{23}=[0 0 0 0 0];

soixquinze{24}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{1}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{2}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{3}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{4}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{5}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{6}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{7}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{8}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{9}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{10}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{11}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{12}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{13}=[0 0 0 34 0];
soixquinze{14}=[9 0 8 63 9];
soixquinze{15}=[41 0 40 82 41];
soixquinze{16}=[63 22 63 98 63];
soixquinze{17}=[82 45 81 0 82];
soixquinze{18}=[100 63 99 0 100];
soixquinze{19}=[0 81 0 0 0];
soixquinze{20}=[0 0 0 0 0];

```

```
soixquinze{21}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{22}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
qdix{24}=[0 0 0 0 0];
qdix{1}=[0 0 0 0 0];
qdix{2}=[0 0 0 0 0];
qdix{3}=[0 0 0 0 0];
qdix{4}=[0 0 0 0 0];
qdix{5}=[0 0 0 0 0];
qdix{6}=[0 0 0 0 0];
qdix{7}=[0 0 0 0 0];
qdix{8}=[0 0 0 0 0];
qdix{9}=[0 0 0 0 0];
qdix{10}=[0 0 0 0 0];
qdix{11}=[0 0 0 0 0];
qdix{12}=[0 0 0 0 0];
qdix{13}=[0 0 0 0 0];
qdix{14}=[0 0 0 0 46];
qdix{15}=[32 0 31 77 32];
qdix{16}=[60 23 60 97 60];
qdix{17}=[81 48 81 0 81];
qdix{18}=[100 67 100 0 100];
qdix{19}=[0 84 0 0 0];
qdix{20}=[0 0 0 0 0];
qdix{21}=[0 0 0 0 0];
qdix{22}=[0 0 0 0 0];
qdix{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
centcing{24}=[0 0 0 0 0];
centcing{1}=[0 0 0 0 0];
centcing{2}=[0 0 0 0 0];
centcing{3}=[0 0 0 0 0];
centcing{4}=[0 0 0 0 0];
centcing{5}=[0 0 0 0 0];
centcing{6}=[0 0 0 0 0];
centcing{7}=[0 0 0 0 0];
centcing{8}=[0 0 0 0 0];
centcing{9}=[0 0 0 0 0];
centcing{10}=[0 0 0 0 0];
centcing{11}=[0 0 0 0 0];
centcing{12}=[0 0 0 66 0];
centcing{13}=[0 0 0 97 0];
centcing{14}=[0 0 0 0 0];
centcing{15}=[12 0 12 0 12];
centcing{16}=[54 19 53 0 54];
centcing{17}=[80 48 79 0 80];
centcing{18}=[100 69 99 0 100];
centcing{19}=[0 86 0 0 0];
centcing{20}=[0 0 0 0 0];
centcing{21}=[0 0 0 0 0];
centcing{22}=[0 0 0 0 0];
centcing{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
centv{24}=[0 0 0 0 0];
centv{1}=[0 0 0 0 0];
centv{2}=[0 0 0 0 0];
centv{3}=[0 0 0 0 0];
centv{4}=[0 0 0 0 0];
centv{5}=[0 0 0 0 0];
centv{6}=[0 0 0 0 0];
centv{7}=[0 0 0 0 0];
centv{8}=[0 0 0 0 0];
```

```

centv{9}=[0 0 0 0 0];
centv{10}=[0 0 0 0 0];
centv{11}=[0 0 0 0 0];
centv{12}=[0 0 0 0 0];
centv{13}=[0 0 0 0 0];
centv{14}=[0 0 0 0 0];
centv{15}=[0 0 0 0 0];
centv{16}=[40 7 39 95 40];
centv{17}=[76 44 75 0 76];
centv{18}=[100 68 99 0 100];
centv{19}=[0 86 0 0 0];
centv{20}=[0 0 0 0 0];
centv{21}=[0 0 0 0 0];
centv{22}=[0 0 0 0 0];
centv{23}=[0 0 0 0 0];

```

```

ctcinq{24}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{1}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{2}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{3}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{4}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{5}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{6}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{7}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{8}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{9}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{10}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{11}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{12}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{13}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{14}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{15}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{16}=[3 0 3 0 3];
ctcinq{17}=[68 34 67 0 68];
ctcinq{18}=[100 64 99 0 100];
ctcinq{19}=[0 85 0 0 0];
ctcinq{20}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{21}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{22}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{23}=[0 0 0 0 0];

```

```

ccinquante{24}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{1}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{2}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{3}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{4}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{5}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{6}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{7}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{8}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{9}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{10}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{11}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{12}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{13}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{14}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{15}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{16}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{17}=[44 13 44 0 44];
ccinquante{18}=[100 57 99 0 100];
ccinquante{19}=[0 83 0 0 0];
ccinquante{20}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{21}=[0 0 0 0 0];

```

```
ccinquante{22}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
cscinq{24}=[0 0 0 0 0];
cscinq{1}=[0 0 0 0 0];
cscinq{2}=[0 0 0 0 0];
cscinq{3}=[0 0 0 0 0];
cscinq{4}=[0 0 0 0 0];
cscinq{5}=[0 0 0 0 0];
cscinq{6}=[0 0 0 0 0];
cscinq{7}=[0 0 0 0 0];
cscinq{8}=[0 0 0 0 0];
cscinq{9}=[0 0 0 0 0];
cscinq{10}=[0 0 0 0 0];
cscinq{11}=[0 0 0 0 0];
cscinq{12}=[0 0 0 0 0];
cscinq{13}=[0 0 0 0 0];
cscinq{14}=[0 0 0 0 0];
cscinq{15}=[0 0 0 0 0];
cscinq{16}=[0 0 0 0 0];
cscinq{17}=[0 0 0 0 0];
cscinq{18}=[100 41 98 0 100];
cscinq{19}=[0 79 0 0 0];
cscinq{20}=[0 0 0 0 0];
cscinq{21}=[0 0 0 0 0];
cscinq{22}=[0 0 0 0 0];
cscinq{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
cqvingt{24}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{1}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{2}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{3}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{4}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{5}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{6}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{7}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{8}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{9}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{10}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{11}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{12}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{13}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{14}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{15}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{16}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{17}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{18}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{19}=[0 70 0 0 0];
cqvingt{20}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{21}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{22}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
masque_sud=zeros(1,8760);
masque_quinze=zeros(1,8760);
masque_trente=zeros(1,8760);
masque_qcinq=zeros(1,8760);
masque_soix=zeros(1,8760);
masque_soixquinze=zeros(1,8760);
masque_qdix=zeros(1,8760);
```

```

masque_centcinq=zeros(1,8760);
masque_centv=zeros(1,8760);
masque_ctcinq=zeros(1,8760);
masque_ccinquante=zeros(1,8760);
masque_cscinq=zeros(1,8760);
masque_cqvingt=zeros(1,8760);

annee=1:8760;
k=0;

for i=1:365
    for j=1:24
        k=k+1;
        if j==1
            masque_sud(k)=interp1(x{24},sud{24},k);
            masque_quinze(k)=interp1(x{24},quinze{24},k);
            masque_trente(k)=interp1(x{24},trente{24},k);
            masque_qcinq(k)=interp1(x{24},qcinq{24},k);
            masque_soix(k)=interp1(x{24},soix{24},k);

masque_soixquinze(k)=interp1(x{24},soixquinze{24},k);
            masque_qdix(k)=interp1(x{24},qdix{24},k);
            masque_centcinq(k)=interp1(x{24},centcinq{24},k);
            masque_centv(k)=interp1(x{24},centv{24},k);
            masque_ctcinq(k)=interp1(x{24},ctcinq{24},k);

masque_ccinquante(k)=interp1(x{24},ccinquante{24},k);
            masque_cscinq(k)=interp1(x{24},cscinq{24},k);
            masque_cqvingt(k)=interp1(x{24},cqvingt{24},k);
        else
            masque_sud(k)=interp1(x{j-1},sud{j-1},k);
            masque_quinze(k)=interp1(x{j-1},quinze{j-1},k);
            masque_trente(k)=interp1(x{j-1},trente{j-1},k);
            masque_qcinq(k)=interp1(x{j-1},qcinq{j-1},k);
            masque_soix(k)=interp1(x{j-1},soix{j-1},k);
            masque_soixquinze(k)=interp1(x{j-1},soixquinze{j-
1},k);

            masque_qdix(k)=interp1(x{j-1},qdix{j-1},k);
            masque_centcinq(k)=interp1(x{j-1},centcinq{j-1},k);
            masque_centv(k)=interp1(x{j-1},centv{j-1},k);
            masque_ctcinq(k)=interp1(x{j-1},ctcinq{j-1},k);
            masque_ccinquante(k)=interp1(x{j-1},ccinquante{j-
1},k);

            masque_cscinq(k)=interp1(x{j-1},cscinq{j-1},k);
            masque_cqvingt(k)=interp1(x{j-1},cqvingt{j-1},k);
        end
    end
end

end

%8760-5760=3000 heures non chauffées, soit du 1/05 au 2/09
compris
%On intègre de 1 à 2880 puis de 5880 à 8760
%plot(annee,masque_centcinq) pour tracer le masque selon
l'orientation

%on prend la moyenne du masque en journée (inutile de prendre
le masque de
%0% la nuit car pas de soleil & ça ferait chuter la moyenne)

```

```

decl=zeros(1,120);
duree1=zeros(1,120);
dec2=zeros(1,120);
duree2=zeros(1,120);

for i=1:120
    decl(i)=23.45*sind((i+284)*360/365);
    duree1(i)=2/15*acosd(-tand(47.37)*tand(decl(i)));
end

for i=246:365
    dec2(i-245)=23.45*sind((i+284)*360/365);
    duree2(i-245)=2/15*acosd(-tand(47.37)*tand(dec2(i-245)));
end
duree_totale=sum(duree1)+sum(duree2);

m_sud=(trapz(annee(1:2880),masque_sud(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_sud(5880:8760)))/duree_totale;
m_quinze=(trapz(annee(1:2880),masque_quinze(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_quinze(5880:8760)))/duree_totale;
m_trente=(trapz(annee(1:2880),masque_trente(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_trente(5880:8760)))/duree_totale;
m_qcinq=(trapz(annee(1:2880),masque_qcinq(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_qcinq(5880:8760)))/duree_totale;
m_soix=(trapz(annee(1:2880),masque_soix(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_soix(5880:8760)))/duree_totale;
m_soixquinze=(trapz(annee(1:2880),masque_soixquinze(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_soixquinze(5880:8760)))/duree_totale;
m_qdix=(trapz(annee(1:2880),masque_qdix(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_qdix(5880:8760)))/duree_totale;
m_centcinq=(trapz(annee(1:2880),masque_centcinq(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_centcinq(5880:8760)))/duree_totale;
m_centv=(trapz(annee(1:2880),masque_centv(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_centv(5880:8760)))/duree_totale;
m_ctcinq=(trapz(annee(1:2880),masque_ctcinq(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_ctcinq(5880:8760)))/duree_totale;
m_ccinquante=(trapz(annee(1:2880),masque_ccinquante(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_ccinquante(5880:8760)))/duree_totale;
m_cscinq=(trapz(annee(1:2880),masque_cscinq(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_cscinq(5880:8760)))/duree_totale;
m_cqvingt=(trapz(annee(1:2880),masque_cqvingt(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),masque_cqvingt(5880:8760)))/duree_totale;

tours_masque=[m_sud    m_quinze    m_trente    m_qcinq    m_soix
m_soixquinze m_qdix m_centcinq m_centv m_ctcinq m_ccinquante
m_cscinq m_cqvingt]/100;

```

1.2 Programme 1.2: Calcul des apports solaires

```
heures=zeros(24,5);
heures(1,1:5)=[1 1897 4105 6313 8737];

for i=2:24
    for j=1:5
        heures(i,j)=heures(i-1,j)+1;
    end
end

x{24}=heures(1,1:end);
x{1}=heures(2,1:end);
x{2}=heures(3,1:end);
x{3}=heures(4,1:end);
x{4}=heures(5,1:end);
x{5}=heures(6,1:end);
x{6}=heures(7,1:end);
x{7}=heures(8,1:end);
x{8}=heures(9,1:end);
x{9}=heures(10,1:end);
x{10}=heures(11,1:end);
x{11}=heures(12,1:end);
x{12}=heures(13,1:end);
x{13}=heures(14,1:end);
x{14}=heures(15,1:end);
x{15}=heures(16,1:end);
x{16}=heures(17,1:end);
x{17}=heures(18,1:end);
x{18}=heures(19,1:end);
x{19}=heures(20,1:end);
x{20}=heures(21,1:end);
x{21}=heures(22,1:end);
x{22}=heures(23,1:end);
x{23}=heures(24,1:end);

%Données pour chaque orientation

sud{24}=[0 0 0 0 0];
sud{1}=[0 0 0 0 0];
sud{2}=[0 0 0 0 0];
sud{3}=[0 0 0 0 0];
sud{4}=[0 0 0 0 0];
sud{5}=[0 0 0 0 0];
sud{6}=[0 0 0 0 0];
sud{7}=[71 0 71 0 71];
sud{8}=[230 54 230 5 230];
sud{9}=[390 181 390 228 390];
sud{10}=[519 286 520 426 519];
sud{11}=[603 355 603 542 603];
sud{12}=[631 379 632 579 631];
sud{13}=[603 355 603 542 603];
sud{14}=[519 286 520 426 519];
sud{15}=[390 181 390 228 390];
sud{16}=[230 54 230 5 230];
sud{17}=[71 0 71 0 71];
sud{18}=[0 0 0 0 0];
sud{19}=[0 0 0 0 0];
```

```

sud{20}=[0 0 0 0 0];
sud{21}=[0 0 0 0 0];
sud{22}=[0 0 0 0 0];
sud{23}=[0 0 0 0 0];

quinze{24}=[0 0 0 0 0];
quinze{1}=[0 0 0 0 0];
quinze{2}=[0 0 0 0 0];
quinze{3}=[0 0 0 0 0];
quinze{4}=[0 0 0 0 0];
quinze{5}=[0 0 0 0 0];
quinze{6}=[0 0 0 0 0];
quinze{7}=[0 0 0 0 0];
quinze{8}=[82 0 80 3 82];
quinze{9}=[240 27 238 169 240];
quinze{10}=[397 168 396 353 397];
quinze{11}=[527 285 525 487 527];
quinze{12}=[612 366 610 560 612];
quinze{13}=[641 400 639 559 641];
quinze{14}=[609 385 608 471 609];
quinze{15}=[516 324 515 271 516];
quinze{16}=[363 223 363 7 363];
quinze{17}=[161 99 164 0 161];
quinze{18}=[0 0 0 0 0];
quinze{19}=[0 0 0 0 0];
quinze{20}=[0 0 0 0 0];
quinze{21}=[0 0 0 0 0];
quinze{22}=[0 0 0 0 0];
quinze{23}=[0 0 0 0 0];

trente{24}=[0 0 0 0 0];
trente{1}=[0 0 0 0 0];
trente{2}=[0 0 0 0 0];
trente{3}=[0 0 0 0 0];
trente{4}=[0 0 0 0 0];
trente{5}=[0 0 0 0 0];
trente{6}=[0 0 0 0 0];
trente{7}=[0 0 0 0 0];
trente{8}=[0 0 0 1 0];
trente{9}=[73 0 70 98 73];
trente{10}=[247 38 245 255 247];
trente{11}=[413 196 412 399 413];
trente{12}=[549 328 547 502 549];
trente{13}=[634 418 632 539 634];
trente{14}=[656 458 655 484 656];
trente{15}=[605 443 605 296 605];
trente{16}=[471 376 472 8 471];
trente{17}=[241 264 245 0 241];
trente{18}=[0 128 0 0 0];
trente{19}=[0 15 0 0 0];
trente{20}=[0 0 0 0 0];
trente{21}=[0 0 0 0 0];
trente{22}=[0 0 0 0 0];
trente{23}=[0 0 0 0 0];

qcing{24}=[0 0 0 0 0];
qcing{1}=[0 0 0 0 0];
qcing{2}=[0 0 0 0 0];
qcing{3}=[0 0 0 0 0];
qcing{4}=[0 0 0 0 0];
qcing{5}=[0 0 0 0 0];
qcing{6}=[0 0 0 0 0];
qcing{7}=[0 0 0 0 0];

```

```

qcinq{8}=[0 0 0 1 0];
qcinq{9}=[0 0 0 21 0];
qcinq{10}=[79 0 77 139 79];
qcinq{11}=[272 94 270 284 272];
qcinq{12}=[448 268 446 410 448];
qcinq{13}=[583 407 582 481 583];
qcinq{14}=[658 500 657 463 658];
qcinq{15}=[653 533 653 301 653];
qcinq{16}=[547 503 549 9 547];
qcinq{17}=[305 410 310 0 305];
qcinq{18}=[0 261 1 0 0];
qcinq{19}=[0 86 0 0 0];
qcinq{20}=[0 0 0 0 0];
qcinq{21}=[0 0 0 0 0];
qcinq{22}=[0 0 0 0 0];
qcinq{23}=[0 0 0 0 0];

```

```

soix{24}=[0 0 0 0 0];
soix{1}=[0 0 0 0 0];
soix{2}=[0 0 0 0 0];
soix{3}=[0 0 0 0 0];
soix{4}=[0 0 0 0 0];
soix{5}=[0 0 0 0 0];
soix{6}=[0 0 0 0 0];
soix{7}=[0 0 0 0 0];
soix{8}=[0 0 0 1 0];
soix{9}=[0 0 0 21 0];
soix{10}=[0 0 0 15 0];
soix{11}=[111 0 110 150 111];
soix{12}=[316 189 316 289 316];
soix{13}=[493 369 492 391 493];
soix{14}=[615 507 615 411 615];
soix{15}=[656 587 657 285 656];
soix{16}=[585 596 588 9 585];
soix{17}=[347 528 354 0 347];
soix{18}=[0 377 1 0 0];
soix{19}=[0 151 0 0 0];
soix{20}=[0 0 0 0 0];
soix{21}=[0 0 0 0 0];
soix{22}=[0 0 0 0 0];
soix{23}=[0 0 0 0 0];

```

```

soixquinze{24}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{1}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{2}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{3}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{4}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{5}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{6}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{7}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{8}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{9}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{10}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{11}=[0 0 0 5 0];
soixquinze{12}=[164 98 163 150 164];
soixquinze{13}=[369 306 369 275 369];
soixquinze{14}=[530 480 531 331 530];
soixquinze{15}=[615 600 617 250 615];
soixquinze{16}=[584 649 588 8 584];
soixquinze{17}=[366 610 374 0 366];
soixquinze{18}=[0 467 1 0 0];
soixquinze{19}=[0 205 0 0 0];
soixquinze{20}=[0 0 0 0 0];

```

```
soixquinze{21}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{22}=[0 0 0 0 0];
soixquinze{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
qdix{24}=[0 0 0 0 0];
qdix{1}=[0 0 0 0 0];
qdix{2}=[0 0 0 0 0];
qdix{3}=[0 0 0 0 0];
qdix{4}=[0 0 0 0 0];
qdix{5}=[0 0 0 0 0];
qdix{6}=[0 0 0 0 0];
qdix{7}=[0 0 0 0 0];
qdix{8}=[0 0 0 0 0];
qdix{9}=[0 0 0 0 0];
qdix{10}=[0 0 0 0 0];
qdix{11}=[0 0 0 0 0];
qdix{12}=[0 0 0 0 0];
qdix{13}=[220 221 220 139 220];
qdix{14}=[409 420 410 228 409];
qdix{15}=[532 572 534 197 532];
qdix{16}=[543 657 547 7 543];
qdix{17}=[360 650 368 0 360];
qdix{18}=[0 525 1 0 0];
qdix{19}=[0 246 0 0 0];
qdix{20}=[0 0 0 0 0];
qdix{21}=[0 0 0 0 0];
qdix{22}=[0 0 0 0 0];
qdix{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
centcinq{24}=[0 0 0 0 0];
centcinq{1}=[0 0 0 0 0];
centcinq{2}=[0 0 0 0 0];
centcinq{3}=[0 0 0 0 0];
centcinq{4}=[0 0 0 0 0];
centcinq{5}=[0 0 0 0 0];
centcinq{6}=[0 0 0 0 0];
centcinq{7}=[0 0 0 0 0];
centcinq{8}=[0 0 0 0 0];
centcinq{9}=[0 0 0 0 0];
centcinq{10}=[0 0 0 0 0];
centcinq{11}=[0 0 0 0 0];
centcinq{12}=[0 0 0 0 0];
centcinq{13}=[56 122 57 0 56];
centcinq{14}=[260 331 261 110 260];
centcinq{15}=[412 506 415 132 412];
centcinq{16}=[465 620 468 5 465];
centcinq{17}=[329 646 337 0 329];
centcinq{18}=[0 547 1 0 0];
centcinq{19}=[0 269 0 0 0];
centcinq{20}=[0 0 0 0 0];
centcinq{21}=[0 0 0 0 0];
centcinq{22}=[0 0 0 0 0];
centcinq{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
centv{24}=[0 0 0 0 0];
centv{1}=[0 0 0 0 0];
centv{2}=[0 0 0 0 0];
centv{3}=[0 0 0 0 0];
centv{4}=[0 0 0 0 0];
centv{5}=[0 0 0 0 0];
centv{6}=[0 0 0 0 0];
centv{7}=[0 0 0 0 0];
centv{8}=[0 0 0 0 0];
```

```

centv{9}=[0 0 0 0 0];
centv{10}=[0 0 0 0 0];
centv{11}=[0 0 0 0 0];
centv{12}=[0 0 0 0 0];
centv{13}=[0 14 0 0 0];
centv{14}=[93 220 95 0 93];
centv{15}=[265 405 267 57 265];
centv{16}=[355 541 358 3 355];
centv{17}=[276 599 283 0 276];
centv{18}=[0 532 1 0 0];
centv{19}=[0 275 0 0 0];
centv{20}=[0 0 0 0 0];
centv{21}=[0 0 0 0 0];
centv{22}=[0 0 0 0 0];
centv{23}=[0 0 0 0 0];

ctcinq{24}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{1}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{2}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{3}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{4}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{5}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{6}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{7}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{8}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{9}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{10}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{11}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{12}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{13}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{14}=[0 94 0 0 0];
ctcinq{15}=[99 276 101 0 99];
ctcinq{16}=[220 426 224 1 220];
ctcinq{17}=[204 510 210 0 204];
ctcinq{18}=[0 481 1 0 0];
ctcinq{19}=[0 261 0 0 0];
ctcinq{20}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{21}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{22}=[0 0 0 0 0];
ctcinq{23}=[0 0 0 0 0];

ccinquante{24}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{1}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{2}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{3}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{4}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{5}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{6}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{7}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{8}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{9}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{10}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{11}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{12}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{13}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{14}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{15}=[0 128 0 0 0];
ccinquante{16}=[71 281 74 0 71];
ccinquante{17}=[118 386 122 0 118];
ccinquante{18}=[0 397 1 0 0];
ccinquante{19}=[0 230 0 0 0];
ccinquante{20}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{21}=[0 0 0 0 0];

```

```
ccinquante{22}=[0 0 0 0 0];
ccinquante{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
cscinq{24}=[0 0 0 0 0];
cscinq{1}=[0 0 0 0 0];
cscinq{2}=[0 0 0 0 0];
cscinq{3}=[0 0 0 0 0];
cscinq{4}=[0 0 0 0 0];
cscinq{5}=[0 55 0 0 0];
cscinq{6}=[0 14 0 0 0];
cscinq{7}=[0 0 0 0 0];
cscinq{8}=[0 0 0 0 0];
cscinq{9}=[0 0 0 0 0];
cscinq{10}=[0 0 0 0 0];
cscinq{11}=[0 0 0 0 0];
cscinq{12}=[0 0 0 0 0];
cscinq{13}=[0 0 0 0 0];
cscinq{14}=[0 0 0 0 0];
cscinq{15}=[0 0 0 0 0];
cscinq{16}=[0 117 0 0 0];
cscinq{17}=[24 236 26 0 24];
cscinq{18}=[0 285 0 0 0];
cscinq{19}=[0 183 0 0 0];
cscinq{20}=[0 0 0 0 0];
cscinq{21}=[0 0 0 0 0];
cscinq{22}=[0 0 0 0 0];
cscinq{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
cqvingt{24}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{1}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{2}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{3}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{4}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{5}=[0 123 0 0 0];
cqvingt{6}=[0 155 0 0 0];
cqvingt{7}=[0 70 0 0 0];
cqvingt{8}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{9}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{10}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{11}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{12}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{13}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{14}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{15}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{16}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{17}=[0 70 0 0 0];
cqvingt{18}=[0 155 0 0 0];
cqvingt{19}=[0 123 0 0 0];
cqvingt{20}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{21}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{22}=[0 0 0 0 0];
cqvingt{23}=[0 0 0 0 0];
```

```
soleil_sud=zeros(1,8760);
soleil_quinze=zeros(1,8760);
soleil_trente=zeros(1,8760);
soleil_qcinq=zeros(1,8760);
soleil_soix=zeros(1,8760);
soleil_soixquinze=zeros(1,8760);
soleil_qdix=zeros(1,8760);
```

```

soleil_centcinq=zeros(1,8760);
soleil_centv=zeros(1,8760);
soleil_ctcinq=zeros(1,8760);
soleil_ccinquante=zeros(1,8760);
soleil_cscinq=zeros(1,8760);
soleil_cqvingt=zeros(1,8760);

annee=1:8760;
k=0;

for i=1:365
    for j=1:24
        k=k+1;
        if j==1
            soleil_sud(k)=interp1(x{24},sud{24},k);
            soleil_quinze(k)=interp1(x{24},quinze{24},k);
            soleil_trente(k)=interp1(x{24},trente{24},k);
            soleil_qcinq(k)=interp1(x{24},qcinq{24},k);
            soleil_soix(k)=interp1(x{24},soix{24},k);

soleil_soixquinze(k)=interp1(x{24},soixquinze{24},k);
soleil_qdix(k)=interp1(x{24},qdix{24},k);
soleil_centcinq(k)=interp1(x{24},centcinq{24},k);
soleil_centv(k)=interp1(x{24},centv{24},k);
soleil_ctcinq(k)=interp1(x{24},ctcinq{24},k);

soleil_ccinquante(k)=interp1(x{24},ccinquante{24},k);
soleil_cscinq(k)=interp1(x{24},cscinq{24},k);
soleil_cqvingt(k)=interp1(x{24},cqvingt{24},k);
        else
            soleil_sud(k)=interp1(x{j-1},sud{j-1},k);
            soleil_quinze(k)=interp1(x{j-1},quinze{j-1},k);
            soleil_trente(k)=interp1(x{j-1},trente{j-1},k);
            soleil_qcinq(k)=interp1(x{j-1},qcinq{j-1},k);
            soleil_soix(k)=interp1(x{j-1},soix{j-1},k);
            soleil_soixquinze(k)=interp1(x{j-1},soixquinze{j-
1},k);

            soleil_qdix(k)=interp1(x{j-1},qdix{j-1},k);
            soleil_centcinq(k)=interp1(x{j-1},centcinq{j-1},k);
            soleil_centv(k)=interp1(x{j-1},centv{j-1},k);
            soleil_ctcinq(k)=interp1(x{j-1},ctcinq{j-1},k);
            soleil_ccinquante(k)=interp1(x{j-1},ccinquante{j-
1},k);

            soleil_cscinq(k)=interp1(x{j-1},cscinq{j-1},k);
            soleil_cqvingt(k)=interp1(x{j-1},cqvingt{j-1},k);
        end
    end
end

%8760-5760=3000 heures non chauffées, soit du 1/05 au 2/09
compris
%On intègre de 1 à 2880 puis de 5880 à 8760
%plot(annee,soleil_centcinq) pour tracer le soleil selon
l'orientation

as_sud=trapz(annee(1:2880),soleil_sud(1:2880))+trapz(annee(5880
:8760),soleil_sud(5880:8760));

as_quinze=trapz(annee(1:2880),soleil_quinze(1:2880))+trapz(annee
(5880:8760),soleil_quinze(5880:8760));

```

```

as_trente=trapz(annee(1:2880),soleil_trente(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_trente(5880:8760));

as_qcinq=trapz(annee(1:2880),soleil_qcinq(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_qcinq(5880:8760));

as_soix=trapz(annee(1:2880),soleil_soix(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_soix(5880:8760));

as_soixquinze=trapz(annee(1:2880),soleil_soixquinze(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_soixquinze(5880:8760));

as_qdix=trapz(annee(1:2880),soleil_qdix(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_qdix(5880:8760));

as_centcinq=trapz(annee(1:2880),soleil_centcinq(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_centcinq(5880:8760));

as_centv=trapz(annee(1:2880),soleil_centv(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_centv(5880:8760));

as_ctcinq=trapz(annee(1:2880),soleil_ctcinq(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_ctcinq(5880:8760));

as_ccinquante=trapz(annee(1:2880),soleil_ccinquante(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_ccinquante(5880:8760));

as_cscinq=trapz(annee(1:2880),soleil_cscinq(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_cscinq(5880:8760));

as_cqvingt=trapz(annee(1:2880),soleil_cqvingt(1:2880))+trapz(annee(5880:8760),soleil_cqvingt(5880:8760));

tours_as=[as_sud    as_quinze    as_trente    as_qcinq    as_soix
as_soixquinze    as_qdix    as_centcinq    as_centv    as_ctcinq
as_ccinquante as_cscinq as_cqvingt];

```

2. Programme 2 : Sélection des parcelles

```
% pgprinc

N=xlsread ('parcelles1.xls');
P=critereP(N);
Q=critereP1(N);
V=critereP2(N);

%critèreP sont des programmes de type fonction effectuant la
sélection

xlswrite('parcelles_pot5MW.xls',P);
xlswrite('parcelles1_pot2MW.xls',Q);
xlswrite('parcelles2_pot1MW.xls',V);

% P est le tableau des grandes parcelles
% Q moyennes parcelles
% V petites parcelles
```

2.1 Programme 2.1 : Sélection des parcelles

```
function P=critereP(N)

% l=nombre de ligne de N ;
l=size(N,1);

% c= nombre de colonne de N;
c=size(N,2);

B=zeros(l,c);

j=0;

for i=1:l;

    if N(i,10)==1 & N(i,2)>=2500 & N(i,3)==1 & N(i,4)==0 &
N(i,6)==1 & N(i,9)>2.2;

        % i,2: surface sup à 900 m2 (2500 avec contrainte des 10 m)

        % i,3: zone constructible

        % i,4: pas d'aléa inondation

        % i,6=1: route présente à moins de 10m

        % i,9> 2,2 rapport Périmètre/grd axe sup à 2,1 pr éviter
parcelles

        % lanières

        % i,10=1 centroide dans la parcelle

        j=j+1;

        for k=1:c;

            B(j,k)=N(i,k);

        end

    end

P=zeros(j,c);

for a=1:j;

    for b=1:c;

        P(a,b)=B(a,b);

    end

end

end
```

3. Programme 3 : Zones de collecte et de distribution

```
C=xlsread('od_5_chaudieres.xls');
C=C';
D=xlsread('pic_vitrage2.xls');
nb=input('Entrez le nb de méthaniseurs');
n=size(C,2);
%C(1,2:n) On ne prend pas la première colonne car c'est les id
des noeuds
for i=1:nb
l=input('Numéro du noeud');
A{i}=[C(1,2:n);C(1+1,2:n);D(2,:)];
[pasbesoin,idx]=sort(A{i}(2,:));
A{i}=A{i}(:,idx);
end

for i=1:nb
M{i}=zeros(1,n-1);%Chemin emprunté pr chaque méthaniseur
end
S=zeros(1,nb);%Somme des déchets pr chaque méthaniseur
P=zeros(1,n-1);%stockage des noeuds utilisés

k=1;
for j=1:n-1
if A{i}(3,j)==0
P(1,k)=A{i}(1,j);
k=k+1;
end
end

v=1;
while any(S<20000000) && isempty(find(P==0))==0
for i=1:nb
j=1;
if S(1,i)<20000000
while isempty(find(P==A{i}(1,j)))==0
j=j+1;
end
M{i}(1,v)=A{i}(1,j);
S(1,i)=S(1,i)+A{i}(3,j);
P(1,k)=A{i}(1,j);
k=k+1;
end
end
v=v+1;
end
```

4. Programme 4 : Calcul des quantités de bois

```
pg princ reflexion inverse determination quantite de bois;
d=input('le nbre de kWh nécessaire en sortie chaudière');
c=d/0.85
%chaudière avec rendement de 85%
%h1=input('entrer l humidite des feuillus voulue de 0 à 100 ');
%h2=input('entrer l humidite des résineux voulue de 0 à 100 ');
h=40;
f=input('entrer la proportion de besoin assouvi par les
feuillus de 0 à 1');
p1=5072.2-57.696*h;
p2=5333.7-60.309*h;
qtt1=(c*f)/p1;
qtt2=(c*(1-f))/p2;
disp([num2str(qtt1) ' t de feuillus avec ' num2str(h) ' % d
humidité']);
disp([num2str(qtt2) ' t de resineux avec ' num2str(h) ' % d
humidité']);
t=qtt1+qtt2
%est le nbre de tonnes total
Ha=t/240
%ha est la surface de foret de 80 ans nécessaire
```

5. Programme 5 : Sélection des parcelles éligibles à l'implantation des unités de récupération de chaleur des eaux usées

```
function Q=Choixparcellesrecuperationchaleureauxusees(N)
% l=nombre de ligne de N ;
l=size(N,1);
% c= nombre de colonne de N;
c=size(N,2);
B=zeros(l,c);
j=0;
for i=1:l;
    if N(i,2)>=4000 & N(i,3)==1 & N(i,4)>=0 & N(i,4)<=2 &
N(i,7)>=200 ;
        % 4 critères pris en compte
        % (surface,constructibilité,inondabilité,longueur minimale
include
        j=j+1;
        for k=1:c;
            B(j,k)=N(i,k);
        end
    end
end

Q=zeros(j,c);
for a=1:j;
    for b=1:c;
        Q(a,b)=B(a,b);
    end
end

xlswrite('resultatparcellesrecuperationchaleureauxusees.xls',Q)
;
```

5.1 Programme 5.1 : sélection des parcelles éligibles à l'implantation d'unités de méthanisation

```
function P=Choixparcellesmethanisation(N);
% l=nombre de ligne de N ;
l=size(N,1);
% c= nombre de colonne de N;
c=size(N,2);
B=zeros(l,c);
j=0;
for i=1:l;
    if N(i,2)>32000 & N(i,3)==1 & N(i,4)==0 & N(i,5)>60 &
N(i,6)==1;
        % 5 critères: Surface(variant selon les scénarios),
        % constructibilité,inondabilité, distance à la plus proche
habitation et
        % présence d'un axe routier important
        j=j+1;
        for k=1:c;
            B(j,k)=N(i,k);
        end
    end
end

P=zeros(j,c);
for a=1:j;
    for b=1:c;
        P(a,b)=B(a,b);
    end
end
xlswrite('resultatparcellesmethanisation.xls',P);
```

6. Programme 6 : Mise en forme de la matrice des noeuds du réseau

```
A=[1:14871];
A=A';
B=zeros(14871,1);
A=[A,B];
B=xlsread('pic_vitrage.xls');
for i=1:8946
    a=B(i,1);
    A(a,2)=B(i,2);
end
A=A';
xlswrite('pic_vitrage2.xls',A);
```

7. Programme 7 : Algorithme de Floyd, calcul de plus court chemin

```
function [S, P]=FloydSP(Adj)
n=length(Adj(1,:));      % Adj: Matrice d'adjacence
P=-1*ones(n,n);        % P: noeud suivant (pour savoir par où on passe pour
                        % aller d'un noeud à un autre)
S=Adj;                  % S: distance au noeud de destination
for i=1:n;
    for j=1:n;
        for k=1:n;
            if S(i,j)>S(i,k)+S(k,j)
                if P(i,k)==-1;
                    P(i,j)=k;
                else
                    P(i,j)=P(i,k);
                end;
                S(i,j)=S(i,k)+S(k,j);
            end;
        end;
    end;
end;
```

8. Programme 8: Recherche du plus proche producteur pour chaque consommateur

```
function [S,P,A] = Nearest_prod (A,D)
[S,P] = FloydSP (D);
n = size (D,1);

for i = 1:n;
    for j=1:n;
        if A(i,2) == 1 && A(j,2) == 2;
            if A(i,6) > S(i,j);
                A(i,6) = S(i,j);
                A(i,5) = j;
            end;
        end;
    end;
end;
```

9. Programme 9 : Calcul des besoins cumulés par arc

```
function B = Besoins_cumules (A,P)
n = size (P,1);    % n = nombre de lignes de P,nombre de noeuds du réseau
B = zeros (n,n);  % matrice des besoins cumulés
k = 0;
j = 0;

for i = 1:n;
k = i;
    if A(i,2) == 1;
        j = A(i,5);
        while P(k,j) ~= -1;    % attribut les besoins de i à l'ensemble
                                % des arcs de i à j
            B(k,P(k,j)) = B(k,P(k,j)) + A(i,3);
            k = P(k,j);
        end;
        B(k,j) = B(k,j) + A(i,3);
    end;
end;
```

10. Programme 10 : Calcul de la densité thermique, ou rentabilité, de chaque arc

```
function R = Densite_thermique (S,B)
n = size (S,1);    % n = nombre de lignes de P, nombre de noeuds du
                  % réseau
R = zeros (n,n);   % matrice de rentabilité

for i = 1:n;
    for j = 1:n;
        R(i,j) = B(i,j)/S(i,j)
    end;
end;
```

11. Extrait de la rubrique n°2910 des ICPE

1.10 - Cas particulier des turbines et moteurs fonctionnant en secours de l'alimentation électrique principale

Les dispositions des articles 2.3, 2.5, 3.8, 5.1 (2e alinéa), 5.9, 5.10 (2e alinéa), 6.2.2 A à D, 6.2.4, 6.2.5, 6.2.6, à l'exception des valeurs limites sur les oxydes de soufre, 6.2.7, 6.2.9, 6.3, 6.4 et 8.4 ne s'appliquent pas aux installations destinées uniquement à secourir l'alimentation électrique des systèmes de sécurité ou à prendre le relais de l'alimentation principale du site en cas de défaillance accidentelle de celle-ci.

2 - Implantation, aménagement

2.1 - Règles d'implantation

(Arr. du 10 août 1998)

Les appareils de combustion sont implantés de manière à prévenir tout risque d'incendie et d'explosion et à ne pas compromettre la sécurité du voisinage, intérieur et extérieur à l'installation. Ils sont suffisamment éloignés de tout stockage et de toute activité mettant en oeuvre des matières combustibles ou inflammables. L'implantation des appareils doit satisfaire aux distances d'éloignement suivantes (les distances sont mesurées en projection horizontale par rapport aux parois extérieures du local qui les abrite ou, à défaut, aux appareils eux-mêmes) :

- a) 10 mètres des limites de propriété et des établissements recevant du public de 1re, 2e, 3e et 4e catégories, des immeubles de grande hauteur, des immeubles habités ou occupés par des tiers et des voies à grande circulation ;
- b) 10 mètres des installations mettant en oeuvre des matières combustibles ou inflammables, y compris les stockages aériens de combustibles liquides ou gazeux destinés à l'alimentation des appareils de combustion présents dans l'installation.

A défaut de satisfaire à cette obligation d'éloignement lors de sa mise en service, l'installation devra respecter les dispositions de l'article 2-4, 3e alinéa.

Les appareils de combustion destinés à la production d'énergie (tels que les chaudières, les turbines ou les moteurs, associés ou non à une postcombustion) doivent être implantés, sauf nécessité d'exploitation justifiée par l'exploitant, dans un local uniquement réservé à cet usage et répondant aux règles d'implantation ci-dessus.

Lorsque les appareils de combustion sont placés en extérieur, des capotages, ou tout autre moyen équivalent, sont prévus pour résister aux intempéries.

2.2 - Intégration dans le paysage

L'exploitant prend les dispositions nécessaires pour satisfaire à l'esthétique du site. L'ensemble du site doit être maintenu en bon état de propreté (peinture, plantations, engazonnement...).

2.3 - Interdiction d'activités au-dessus des installations

Les installations ne doivent pas être surmontées de bâtiments occupés par des tiers, habités ou à usage de bureaux, à l'exception de locaux techniques. Elles ne doivent pas être implantées en sous-sol de ces bâtiments.

2.4 - Comportement au feu et aux explosions des bâtiments

(Arr. du 10 août 1998)

Les locaux abritant l'installation doivent présenter les caractéristiques de réaction et de résistance au feu minimales suivantes :

- matériaux de classe MO (incombustibles) ;
- stabilité au feu de degré une heure ;
- couverture incombustible.

Les locaux doivent être équipés en partie haute de dispositifs permettant l'évacuation des fumées et gaz de combustion dégagés en cas d'incendie (par exemple lanterneaux en toiture, ouvrants en façade ou tout autre moyen équivalent). Les commandes d'ouverture manuelle sont placées à proximité des accès. Le système de désenfumage doit être adapté aux risques particuliers de l'installation. Les locaux où sont utilisés des combustibles susceptibles de provoquer une explosion sont conçus de manière à limiter les effets de l'explosion à l'extérieur du local (événements, parois de faible résistance...).

De plus, les éléments de construction présentent les caractéristiques de comportement au feu suivantes, vis-à-vis des locaux contigus ou des établissements, installations et stockages pour lesquels les distances prévues à l'article 2-1 ne peuvent pas être respectées :

- parois, couverture et plancher haut coupe-feu de degré deux heures ;
- portes intérieures coupe-feu de degré une demi-heure et munies d'un ferme-porte ou d'un dispositif assurant leur fermeture automatique ;
- porte donnant vers l'extérieur coupe-feu de degré une demi-heure au moins.

2.5 - Accessibilité

L'installation doit être accessible pour permettre l'intervention des services d'incendie et de secours. Elle est desservie, sur au moins une face, par une voie-engin ou par une voie-échelle si le plancher haut du bâtiment est à une hauteur supérieure à 8 mètres par rapport à cette voie.

Des aires de stationnement doivent être aménagées pour accueillir les véhicules assurant l'approvisionnement en combustible et, le cas échéant, l'évacuation des cendres et des mâchefers. Cette disposition ne concerne pas les installations dont la durée de fonctionnement est inférieure à 500 h/an.

Un espace suffisant doit être aménagé autour des appareils de combustion, des organes de réglage, de commande, de régulation, de contrôle et de sécurité pour permettre une exploitation normale des installations.

