



POLYTECH[®]
TOURS

Département
Aménagement et Environnement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement

Projet de Fin d'Etudes

TEPOS :
Comment obtenir d'un point de vue
spatial un Territoire à Energie
Positive ?
Application sur la métropole du Grand Lyon



RICAUD Isabelle ~ SICILIA Morgane

2015-2016

Directeur de recherche :
MAIZIA Mindjid



TEPOS :
Comment obtenir d'un point de vue spatial un
Territoire à Energie Positive ?
Application sur la métropole du Grand Lyon

2015-2016
MAIZIA Mindjid

RICAUD Isabelle ~ SICILIA Morgane

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 EN GENIE DE L'AMENAGEMENT

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 de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement 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 toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

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

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique du département d'aménagement de Polytech Tours, et les intervenants professionnels responsables de la formation d'ingénieur en aménagement et en environnement, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci. Pour l'expérience enrichissante, et pleine d'intérêt qu'a été ce travail de recherche, nous tenons à remercier tout particulièrement, et à témoigner toute notre reconnaissance à notre tuteur, Monsieur MAIZIA Mindjid, professeur au département d'aménagement et d'environnement de Polytech Tours, pour ses conseils, sa patience et son amabilité.

SOMMAIRE

AVERTISSEMENT	1
FORMATION PAR LA RECHERCHE ET PROJET DE FIN D'ETUDES EN GENIE DE L'AMENAGEMENT	2
REMERCIEMENTS	3
INTRODUCTION	5
PRESENTATION DE L'ETUDE.....	6
1. Enjeux.....	6
2. Objectifs	9
3. Méthode.....	10
CAS D'ETUDE SUR LE GRAND LYON.....	14
1. Application & résultats	14
2. Grands enseignements de l'étude	15
CONCLUSION	17
SOURCES.....	18
1. Bibliographie	18
2. Webographie.....	18
INDEX DES SIGLES & NOMENCLATURE.....	20
1. Nomenclature.....	20
2. Sigles	20
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	21
ANNEXES.....	22
1. Cartes	23
2. Codage des systèmes.....	26

INTRODUCTION

Afin de lutter contre le réchauffement climatique qui est précipité par l'activité humaine, l'Union Européenne a fixé trois objectifs en matière d'énergie et de climat, à ses pays membres, à réaliser d'ici 2020. Tout d'abord, réduire les émissions de gaz à effet de serre de 20%, par rapport aux niveaux de production de 1990. Ensuite, porter à 20% la part des sources d'énergies renouvelables dans la consommation. Enfin, réduire de 20% la quantité d'énergie primaire consommée, par rapport aux niveaux prévus, pour améliorer l'efficacité énergétique¹.

Dans cette optique, et afin de renforcer son indépendance énergétique, la France a promulgué en août 2015 la loi n° 2015-992 dite « de Transition énergétique pour la Croissance verte ». Cette dernière vise à préparer la période « d'après pétrole », en instaurant un nouveau modèle énergétique français. Etant donné qu'une part très importante de l'énergie utilisée aujourd'hui est polluante, coûteuse, et issue de ressources fossiles qui diminuent. Cette loi est structurée autour de huit grands axes, dont l'un qui définit de « Favoriser les Energies Renouvelables ». Cependant, certains territoires, comme la commune du Mené, avaient d'ores-et-déjà mis en place des démarches respectueuses de l'environnement.

C'est au sein de ce contexte, que la notion de TEPOS est apparue, en septembre 2014. Un TEPOS désigne un territoire² qui s'est engagé dans un certain nombre de démarches accompagnant la Transition Energétique, pour la Croissance Verte, souhaitée par le Gouvernement français. Le Ministre français de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie³, avait lancé en un appel à projets « territoires à énergie positive pour la croissance verte ». Clôturé en Février 2015, sur les 528 territoires participants, 40% ont été désignés TEPOS.

Le nom de territoire « à énergie positive » vient aussi du label BEPOS qui désigne les bâtiments certifiés « à énergie positive ». Ce type de bâtiment consomme moins d'énergie qu'il n'en produit, et sa consommation moyenne d'énergie est estimée à 50 kWh. L'idée des BEPOS a émergé dans les années 1970, et 1990. Ces constructions sont perçues aujourd'hui, comme une avancée majeure en matière de constructions propres. Elles devraient devenir, d'ici les prochaines années, une norme en matière de construction pour les logements neufs.

Bien que cette notion de bâtiment ou de territoire « à énergie positive » puisse sembler idéale, et révolutionnaire, compte-tenu du contexte actuel, cette notion ne semble pas totalement stabilisée. C'est pourquoi nous avons étudié les conditions opérationnelles nécessaires à un territoire, pour qu'il soit qualifié de TEPOS. Ainsi nous avons posé la problématique suivante : Comment obtenir, d'un point de vue spatial, un TEPOS ?

L'objectif de cette étude est double. D'une part, on souhaite spatialiser le transfert d'énergie entre producteurs et consommateurs. Et d'autre part, on a l'ambition de sélectionner sur le territoire, les zones éligibles à l'installation d'équipements qui produisent de l'énergie à partir de ressources durables. Ceci à une échelle plus restreinte, comme une agglomération. Ainsi, dans un premier temps, est présentée la méthodologie pour une modélisation systémique de la problématique. Ensuite, le modèle est appliqué à la métropole du Grand Lyon, dont les résultats sont analysés. Enfin, nous concluons sur les limites de notre modèle et proposerons des pistes afin de l'améliorer.

¹ Source : http://europa.eu/pol/clim/index_fr.htm

² Les TEPOS sont des territoires très différents : parc national, parcs naturels et régionaux, Conseils Départementaux, Pays, EPCI (Communautés de communes – Communautés d'agglomération, Métropoles) et Communes.

³ Mme Ségolène Royal

PRESENTATION DE L'ETUDE

1. Enjeux

La notion de TEPOS⁴ est liée à la notion d'autosuffisance énergétique. En effet, on pose l'hypothèse que les territoires sont capables de produire l'énergie dont ils ont besoin afin de tendre vers une autonomie énergétique. Par ailleurs, dans le contexte mondial actuel, les consommations d'énergies augmentent, notamment du fait du développement des technologies liées à l'informatique et à l'électronique. Il devient primordial de limiter, sinon réduire, les consommations d'énergie qui sont susceptibles de nuire de façon irréversible à l'environnement.

Les TEPOS et leur développement semblent ainsi répondre à plusieurs enjeux primordiaux sur le plan politique, économique, social et environnemental. En France, les TEPOS font partie de la loi sur la transition énergétique mise en place par le Ministère de l'Environnement, ce qui fait d'eux des outils politiques au service du développement de certains territoires. Néanmoins, ils permettent d'ouvrir la voie en matière de production d'énergie locale et renouvelable. On distingue trois enjeux auxquels les TEPOS sont susceptibles de répondre : l'enjeu de l'énergie (et notamment des énergies renouvelables), celui de l'échelle de réflexion et de développement, et enfin l'enjeu de l'intégration au réseau de distribution.

1.1 Energie

De manière universelle on utilise l'énergie pour un certain nombre de tâches quotidiennes : pour se nourrir, pour se déplacer, pour chauffer son logement, etc. Toutefois il faut distinguer les énergies fossiles des énergies dites « renouvelables ». On parle d'énergie fossile pour désigner l'énergie produite à partir de ressources dont les gisements sont limités (ex. le charbon, le pétrole, l'uranium, etc.), et qui nécessitent des procédés d'extraction spécifiques comme les forages. De nombreuses études ont mis en évidence que la production d'énergie à partir de ces ressources avait un impact négatif sur le climat et la qualité de l'environnement. On parle d'énergies renouvelables, EnR, pour désigner l'énergie produite à partir de ressources illimitées (le soleil, le vent, les courants marins, etc.) et dont l'impact sur le climat et la qualité de l'environnement n'est pas le même.

Les TEPOS doivent permettre d'aller vers une « transition énergétique » en permettant le développement des énergies propres afin d'atteindre une part plus importante d'énergie produite par les EnR⁵. Les objectifs fixés par la loi sur la Transition énergétique sont : en 2020, 23% de l'énergie consommée devra avoir été produite par des EnR – en 2030, 32% de l'énergie consommée devra avoir été produite par les EnR.

Ainsi, les TEPOS sont un outil politique au service d'un changement voulu sur le plan de l'énergie.

Il faut aussi rappeler que la France, au sein de l'UE⁶, doit tenir certains objectifs sur le plan de ses consommations d'énergie ou de ses émissions de GES⁷. En effet, en 2009 l'UE a pris l'engagement d'augmenter à 20% la part des énergies renouvelables pour satisfaire sa consommation en énergie primaire, de réduire de 20% ses émissions de GES par rapport à 1990, et enfin de diminuer de 20% sa consommation d'énergie primaire.

L'ensemble de ces engagements oblige les pays membres de l'UE à prendre eux-aussi un certain nombre d'engagements pour satisfaire ceux pris par l'UE. C'est par exemple ce qui est rappelé dans le texte exposant les motifs justifiant le projet de loi relatif à « la transition énergétique pour la croissance verte ». Ainsi les engagements énergétiques pris par la France sont en lien avec ceux pris par l'UE, l'instance supérieure.

Sur le plan énergétique, la France possède un mix énergétique principalement basé sur l'énergie nucléaire, comme le montre la **Fig 1**: Mix Energétique de la France (13 juillet 2015) ci-contre. Ce mix permet à la France de conserver une relative indépendance en matière d'approvisionnement en énergie, mais aussi de proposer

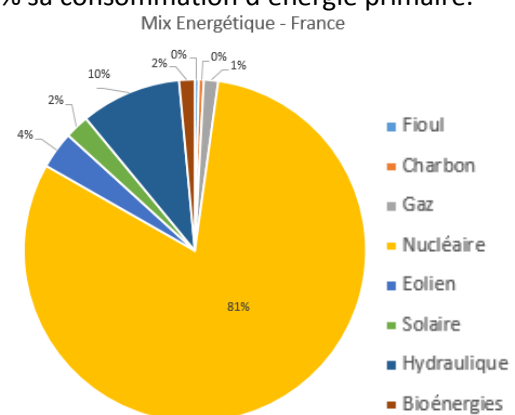


Fig 1: Mix Energétique de la France (13 juillet 2015)

Source : eCO2mix – RTE

<http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>

⁴ TEPOS : Territoire à Energie Positive

⁵ EnR : Energie Renouvelable

⁶ UE : Union Européenne

⁷ GES : Gaz à Effet de Serre

une énergie à un prix compétitif.

1.2 Echelle de développement

En France, l'énergie produite est injectée dans le réseau national. Par conséquent, il existe une forte dépendance entre les territoires pour les questions de l'énergie. Le développement des TEPOS se présente ainsi comme une nouvelle façon de considérer la question de l'approvisionnement des territoires en énergie. Même s'ils restent connectés au réseau pour éviter les problèmes de « black-out » en cas de production locale insuffisante, les territoires produisent tout ou une partie de l'énergie dont ils ont besoin. De ce fait ils deviendraient, en théorie, plus autonomes et moins vulnérables.

Par ailleurs, on peut supposer qu'en développant une production plus locale de l'énergie, on pourrait aussi induire un développement économique local relatif. La mise en place des infrastructures produisant de l'énergie renouvelable (éoliennes et panneaux photovoltaïques, par exemple) nécessite plusieurs étapes avant-projet⁸ ainsi qu'un chantier lors de la construction et une maintenance des équipements. Toutes ces étapes nécessitent des intervenants différents et elles peuvent donc être vectrices d'emplois temporaires ou permanents.

Par ailleurs, dans certains cas il est possible de choisir le type de raccordement au réseau souhaité : raccordement en autoconsommation, de vente en surplus ou bien en vente totale⁹. Dans le premier cas, toute l'énergie produite est consommée, s'il y a un surplus produit celui-ci est injecté gratuitement dans le réseau de distribution. Dans le second cas, l'énergie produite est consommée et le surplus est injecté dans le réseau (vendue au fournisseur). Dans le dernier cas, l'intégralité de l'énergie produite est injectée dans le réseau, néanmoins elle est décomptée de l'énergie consommée.

Ensuite, la réduction de la distance entre les lieux de production et les lieux de consommation aura un impact sur les pertes de charges lors du transport de l'énergie. La distance étant plus courte, les pertes d'énergie seront moindres¹⁰ lors du transport.

D'autre part, on peut aussi espérer réduire en partie l'impact des infrastructures sur l'environnement. Etant donné qu'elles seront dimensionnées selon les besoins réduits à un territoire et non plus à l'échelle nationale. De plus, en produisant localement et en tendant à l'autosuffisance des territoires, on peut espérer réduire la base de production d'énergie à l'échelle nationale, et ainsi réduire nos consommations en énergie fossile.

1.3 Intégration des EnR dans le réseau de distribution

Produire de l'énergie en utilisant la force motrice du vent ou bien du rayonnement solaire, nécessite des infrastructures particulières comme les éoliennes ou les panneaux photovoltaïques. Lorsque ces énergies propres ont commencé à émerger, de nombreux types de structures de production ont aussi vu le jour. Par exemple en ce qui concerne l'énergie éolienne, il existe beaucoup d'éoliennes très différentes tant sur la conception et le design, que sur la capacité de production. On peut ainsi distinguer : les éoliennes « offshore » des éoliennes terrestres, les parcs d'éoliennes (puissance d'environ 3MW par turbine) constitués de grands aérogénérateurs (ratio de 2 pour 1 entre la longueur du mât et celle de la pale de l'éolienne) des éoliennes individuelles¹¹ pour les particuliers.

Par ailleurs le réseau français de distribution est structuré de la manière suivante : un réseau de lignes à très haute tension (400, 225 kV) pour le transport sur de grandes distances, un réseau de lignes à haute tension (150, 90, 63 kV) qui assure la répartition vers les réseaux de lignes à moyenne tension (20 kV, 400 V) ainsi que les industries. On parle aussi d'un réseau maillé pour décrire le réseau de distribution d'électricité français, ce maillage assure une sécurité d'alimentation : il est moins vulnérable face aux aléas et l'on utilise les infrastructures de manière optimale.

Aussi, le réseau est constitué de telle sorte, que l'on ne sait pas d'où provient réellement l'énergie que l'on consomme. On peut modéliser le réseau de transport comme une boîte noire qui relie ensemble les points de production et les points de consommation, sans toutefois définir les liaisons entre les points. Or la mise en place d'un TEPOS suggère aussi qu'on passe d'un système de production électrique « délocalisé » à un système fortement localisé : l'énergie produite ne sert plus à alimenter le mix national mais il sert d'abord à répondre à la demande locale (le territoire du TEPOS).

⁸ On parle ici des études de faisabilité, des études d'impact, etc.

⁹ Ce type de raccordement nécessite 3 compteurs : un compteur « classique » pour la consommation d'électricité, un second compteur pour l'énergie produite, un compteur pour la consommation du matériel électronique.

¹⁰ Toutefois, il faut prendre en considération le type de transport de l'énergie (HT – MT – BT) pour l'affirmer.

¹¹ On parle aussi de « petit éolien » - puissance allant de 0.1 à 36 kW – alimentation de bâtiments isolés.

Dans le cas d'une éolienne, le schéma de fonctionnement permettant de produire l'électricité est indiqué à la **Fig 2**: Schéma de base de l'éolienne connecté au réseau. La turbine est mise en mouvement par la force motrice du vent, ensuite peut se trouver un multiplicateur de vitesse dont le rôle est d'augmenter la vitesse de rotation du rotor pour que le générateur puisse transformer l'énergie cinétique en énergie électrique. Il existe deux technologies de générateurs : à vitesse fixe et à vitesse variable. Enfin le courant électrique passe par un transformateur/onduleur pour convertir la tension afin qu'elle puisse être intégrée dans le réseau de distribution ou bien qu'elle puisse être utilisée directement.

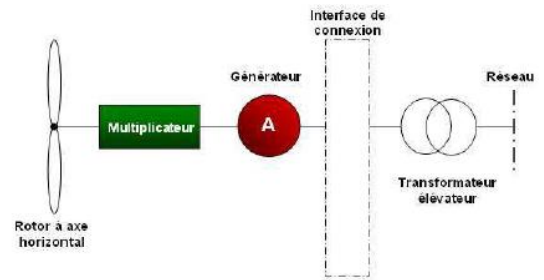


Fig 2: Schéma de base de l'éolienne connecté au réseau
Source : Thèse présentée par RUIZ GOMEZ Lina Maria, **Intégration de la production éolienne aux réseaux électriques : approches techniques et économiques, 2006.**

Ceci nous amène à nous interroger sur la manière dont on relierait les points de production et les points de consommation, pour obtenir un TEPOS. Dans le cas du réseau national, il n'existe pas de liens réels entre les lieux de production d'énergie et ceux où l'on consomme de l'énergie. En revanche, dans le cas d'un TEPOS, l'énergie est produite localement et acheminée aux lieux de consommation situés à proximité. Cependant, on ne sait pas si l'on devra créer un nouveau réseau ou utiliser une partie du réseau existant en le « déconnectant » pour qu'il ne desserve que le TEPOS avec la production locale d'énergie.

D'autre part, selon la taille/surface du TEPOS, on ne privilégiera pas le même type de transport pour l'électricité produite¹² : haute tension (HT), moyenne tension (MT) ou basse tension (BT). Selon ce que l'on choisira, on prendra des câbles adaptés.

¹² En considérant que l'on produira de l'énergie à partir d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques sur le TEPOS.

2. Objectifs

En France, la gestion de l'énergie s'est développée de sorte à proposer une offre sur l'ensemble du territoire. Comme expliqué précédemment, l'électricité qui est produite par les infrastructures est directement aspirée par le réseau national. De ce fait, les territoires sont interdépendants les uns avec les autres, par exemple la région Bretagne est extrêmement dépendante en matière d'énergie.

La littérature donne une description du TEPOS très idéaliste et politique. Notre travail consiste à déterminer si le TEPOS est réalisable, et quelles sont les conditions opérationnelles nécessaires à sa mise en place, dans le contexte français. Il ne s'agit pas non plus de s'intéresser à la réalisabilité du projet sur le plan politique ou économique, mais uniquement sur les plans organisationnel, technique, opérationnel et énergétique.

L'enjeu des territoires à énergie positive est certes de développer le secteur des EnR, mais c'est aussi le fait de réduire les consommations d'énergie à l'échelle nationale en ne répondant plus qu'aux besoins réels et donc en diminuant la base de production.

Notre principal objectif est donc de déterminer si la notion de TEPOS est réaliste, pour cela nous allons donc étudier le lien qui existe entre le TEPOS et à la fois les lieux de production et de consommation d'énergie sur un territoire d'étude. A partir de ce premier objectif, d'autres sous-objectifs apparaissent. En étudiant la production énergétique des panneaux photovoltaïques ainsi que des éoliennes, nous pourrions déterminer le potentiel de ces deux sources d'énergie sur notre territoire d'étude. D'autre part, étudier les besoins des bâtiments du territoire nous permettra de connaître le niveau de consommation attendue.

Pour comprendre de quelles manières les éléments de notre système étaient liés, nous avons eu recours à la modélisation et à la mise en place de scénarios.

D'autre part, notre problématique est aussi liée à des questions d'aménagement du territoire. En effet, dans le cadre du TEPOS on cherche à savoir comment spatialiser le transfert d'énergie électrique entre un lieu de production et un lieu de consommation : c'est-à-dire à savoir comment s'organise le réseau d'énergie.

Ainsi, dans le cadre de cette réflexion on se place à l'échelle du bâtiment et on fait le choix de négliger les pertes d'énergie lors de la conversion (au niveau des infrastructures de production) et lors du transport.

Par conséquent, on doit dans un premier temps déterminer comment relier les points de production d'EnR existants ou potentiels, aux lieux de consommation et selon la distance, à l'échelle de notre territoire d'étude.

Pour cela nous devons déterminer quels sont les besoins électriques des bâtiments, déterminer quels sont les lieux potentiels de production d'EnR sur notre territoire, et enfin calculer les distances entre chacun des points de production et des points de consommation.

Notre objectif est de développer un modèle applicable aussi bien pour l'énergie électrique que pour d'autres formes d'énergie. Puisque la réflexion est analogue, quelle que soit la forme d'énergie considérée. Ainsi on a fait le choix de nous concentrer uniquement sur l'électricité.

Enfin, les bâtiments peuvent avoir besoin d'électricité à la fois pour répondre à leurs besoins dus aux appareils électriques, mais aussi pour répondre à leurs besoins de chauffage. Nous avons posé l'hypothèse que dans un contexte de transition énergétique on cherchait à associer correctement besoins et énergie nécessaire. Ainsi il nous semble plus « propre » de réserver l'électricité pour autre chose que les besoins de chauffage sachant qu'il est possible de produire de la chaleur à partir de ressources renouvelables¹³. Par conséquent, nous ne considérons que les besoins énergétiques des appareils électriques sur le territoire.

Notre objectif est donc de déterminer si sur un territoire d'étude choisi, il est possible de répondre aux besoins des appareils électriques grâce à la production d'énergie par des éoliennes et des panneaux photovoltaïques.

¹³ La biomasse est une source d'énergie permettant de produire de la chaleur directement.

3. Méthode

Nous avons adopté une approche systémique : nous avons cherché à mettre en place un modèle mathématique permettant de répondre à notre objectif global.

D'abord la question posée est reformulée, ceci afin de fixer l'objectif final : savoir quels points de consommation sont reliés à quels points de production. En d'autres termes, quels lieux de production alimentent quels bâtiments.

Ensuite, le problème est modélisé sous forme de calcul mathématique pour obtenir deux éléments : une liste des lieux de production reliés aux lieux de consommation, ainsi qu'un ordonnancement selon la distance et selon le besoin en énergie.

En complétant ce modèle mathématique, on peut déterminer les données dont on aura besoin pour faire fonctionner le système sur le territoire d'étude. Par la suite ces données nécessaires, autrement dit les variables exogènes, sont récoltées ou créées par l'intermédiaire d'un logiciel de SIG¹⁴, ce qui est le cas pour les surfaces des bâtiments ou les pôles de besoin.

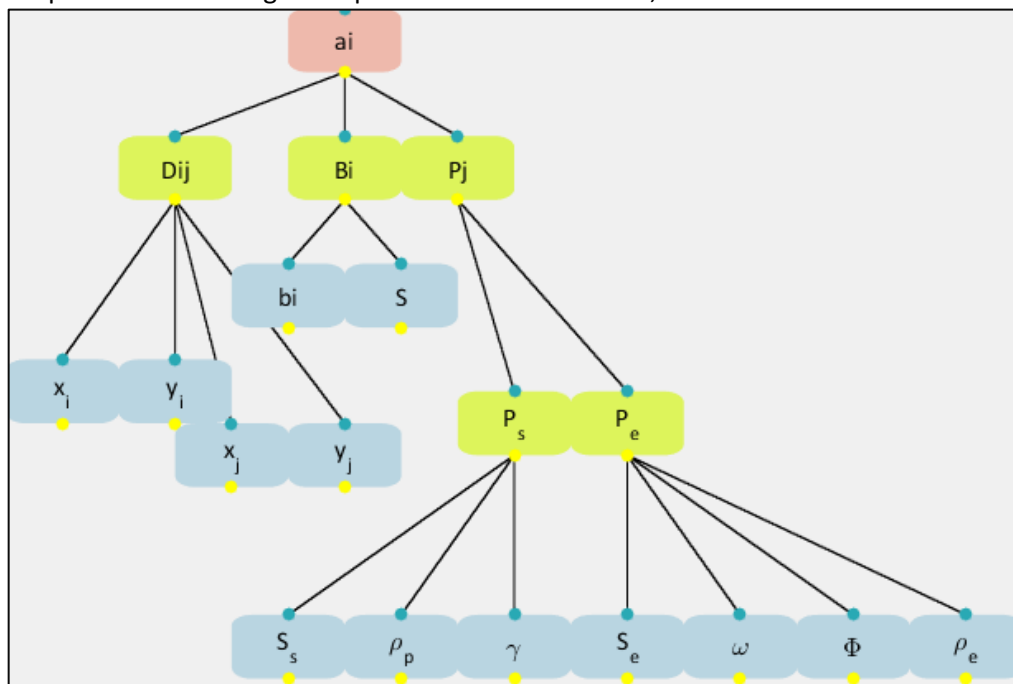
Le modèle est ensuite appliqué sur le territoire d'étude et plusieurs scénarios sont fixés. Ainsi, apparaissent alors les différents leviers du modèle, ainsi que les EnR à privilégier.

Les résultats obtenus sont interprétés, afin de mettre en évidence les limites du système de façon à projeter les solutions pour y remédier.

En résumé, on aboutit à un système global qui répond à l'objectif principal et qui est constitué de plusieurs sous-systèmes¹⁵ qui eux répondent aux sous-objectifs.

3.1 Ordonnancement des lieux de production et des lieux de consommation d'énergie

On a tout d'abord cherché à mettre en place un système permettant de déterminer l'ordre dans lequel les lieux de production étaient reliés aux lieux de consommation. Il s'agit du système présenté en **Fig 3**: Système d'affectation du bâtiment i au point de production j le plus proche, il permet de calculer l'ordre d'affectation des points de production d'énergie aux points de consommation, en fonction de la distance et de façon optimale.



Nomenclature en annexe

Fig 3: Système d'affectation du bâtiment i au point de production j le plus proche

Source : Système « Smartcity », Mindjid MAIZIA – toaster Systems© (Mindjid MAIZIA)

Intégration avec les sous-système, Isabelle RICAUD et Morgane SICILIA – toaster Systems© (Mindjid MAIZIA)

Le système a été construit à partir d'un système appelé « Smartcity » et de sous-systèmes construits ultérieurement. En bleu sont représentées les variables exogènes de notre système, c'est-à-dire les variables qui dépendent de paramètres extérieurs comme par exemple la surface de panneaux photovoltaïques ou bien la vitesse du vent. Certaines de ces variables peuvent même être des leviers pour atteindre notre objectif.

¹⁴ Système d'information Géographique

¹⁵ On peut aussi parler de systèmes sectoriels.

Les variables en jaune correspondent aux variables endogènes de notre système. Il s'agit des variables dont les valeurs dépendent des variables exogènes. Elles ne peuvent pas constituer des leviers pour atteindre notre objectif puisqu'elles dépendent d'autre chose.

Enfin, la variable en rouge correspond à la finalité de notre système, c'est-à-dire à notre résultat.

Le système tel que présenté en **Fig 3**: Système d'affectation du bâtiment i au point de production j le plus proche, est un système qui intègre d'autres sous-systèmes répondant aux sous-objectifs énoncés avant et détaillés après. On repère trois grandes parties : la partie correspondant aux distances entre les points de production et les points de consommation D_{ij} , la partie relative aux besoins des bâtiments B_i , et celle correspondant aux ouvrages de production d'énergie P_j .

3.2 Besoins énergétiques électriques

Pour définir la consommation électrique du territoire B_i , en puissance à chaque instant t , on détermine les besoins d'énergie électrique au mètre carré (m^2), bi , de la région Rhône Alpes, que l'on multiplie par la surface habitable de chaque bâtiment (c.f **Fig 4**: Système présentant les relations fonctionnelles au sein du bâtiment pour les besoins électriques, à chaque instant t et pour chaque lieu de consommation i).

Dans l'optique de faciliter le traitement des données, et de conserver une référence saisonnière des besoins, nous avons retenu la consommation selon le 1^{er} jour de chaque mois, pour chaque heure de la journée. De cette manière, nous obtenons les besoins selon $24 \text{ heures} \times 12 \text{ mois} = 288$ heures de l'année, au lieu de 8760 heures, pour une année complète.

Par ailleurs, nous avons traité la surface des besoins selon deux formats. En premier lieu, nous avons choisi d'établir des pôles de besoins d'énergie électrique i , selon la proximité des bâtiments, dans un rayon de 500m. Etant donné que la zone d'étude est vaste et comprend un nombre important de bâtiments, les rassembler permet de faciliter le traitement des données sur logiciel (notamment Excel). De plus, cela permet, éventuellement, de mutualiser les équipements de transport d'énergie d'un même lieu de production d'énergie, à plusieurs bâtiments consommateurs. Ensuite, étant donné que les besoins étaient trop élevés, nous avons employé la surface par bâtiment i . (c.f **1.1 Pôles de besoins d'énergie du territoire du Grand Lyon**)

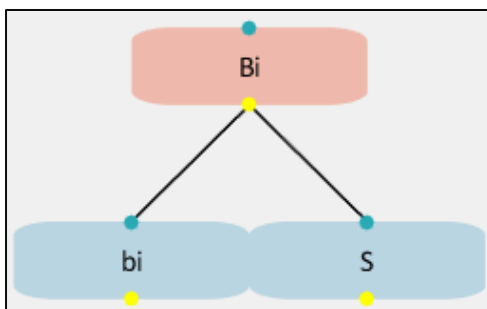


Fig 4: Système présentant les relations fonctionnelles au sein du bâtiment pour les besoins électriques, à chaque instant t et pour chaque lieu de consommation i
Source : I. RICAUD, M. SICILIA – toaster Systems© (M. Maizia)

Nomenclature

Variable	Unité	Définition
B_i	W	Besoins en puissance à chaque instant t pour chaque zone de consommation i
bi	W/m ²	Besoin unitaire en puissance à chaque instant t
S	m ²	Surface par zone de besoin i

3.3 Production d'énergie renouvelable

Afin de répondre aux besoins électriques du Grand Lyon, nous déterminons les points de production d'énergie électrique P_j du territoire. Partant de l'hypothèse que les lieux de production d'EnR ne sont pas suffisants pour alimenter la communauté d'agglomération, nous proposons une méthode définissant le potentiel de production P_p du territoire. Afin de conserver une concordance avec le système des besoins au niveau temporel, nous avons établis la production énergétique selon le 1^{er} jour de chaque mois, et ainsi obtenir une production sur 288 heures. De plus, nous nous sommes concentrés sur l'énergie éolienne et solaire.

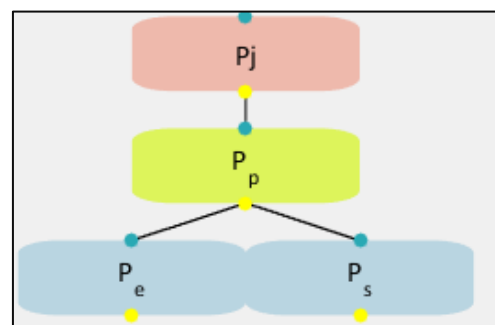


Fig 5: Système calculant la production d'énergie, à chaque instant t et pour chacun des points de production.

Source : I. RICAUD, M. SICILIA – toaster Systems© (Mindjid MAIZIA)

Nomenclature

Variable	Unité	Définition
P_j	W	Production en puissance à chaque instant t pour chaque point de production j
P_p	W	Potentiel de production en puissance à chaque instant t pour chaque point de production potentiel p
P_s	W	Potentiel de production en puissance d'énergie solaire à chaque instant t pour chaque lieu de production s
P_e	W	Potentiel de production en puissance d'énergie éolienne à chaque instant t pour chaque lieu de production e

► **Energie éolienne**

Selon le calcul technique, exposé en **Fig 6**: Potentiel de production en puissance d'énergie éolienne à chaque instant t , la production d'énergie éolienne P_e , est obtenue, en multipliant le nombre d'éoliennes n_e , par leur rendement ρ_e , par le diamètre de l'éolienne ϕ , et enfin par la vitesse du vent ω .

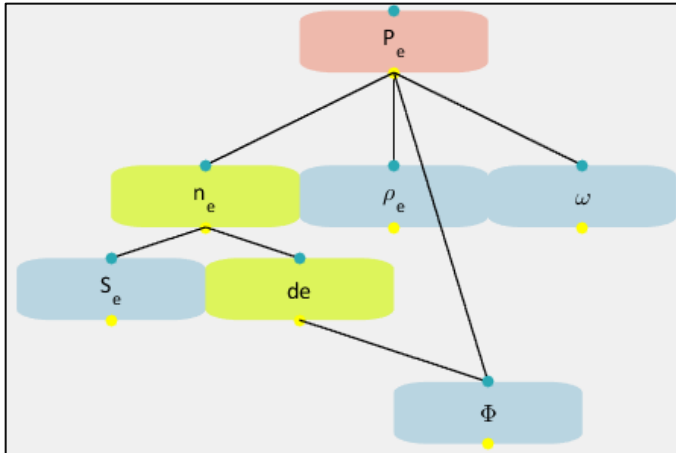


Fig 6: Potentiel de production en puissance d'énergie éolienne à chaque instant t
Source : I. RICAUD, M. SICILIA – toaster Systems© (Mindjid MAIZIA)

Nomenclature

Variable	Unité	Définition
P_e	W	Potentiel de production en puissance d'énergie éolienne à chaque instant t pour chaque lieu de production e
n_e	Eolienne(s)	Nombre d'éoliennes envisageables
de	Eolienne(s)/m ²	Nombre d'éoliennes au m ²
S_e	m ²	Surfaces des zones éligibles e à l'implantation d'éoliennes
ω	m/s	Vitesse du vent
ϕ	m	Diamètre éolienne
ρ_e	-	Rendement éolienne

Hormis le fait que la production d'énergie éolienne dépende principalement de la météo, elle est principalement liée à la quantité d'éolienne. Afin de la mesurer, nous avons besoin de la Surface des zones éligibles S_e , ainsi que du diamètre de l'éolienne ϕ , faisant varier sa densité de .

Nous déterminons la surface des zones éligibles par l'intermédiaire du SIG¹⁶. A partir de la superficie totale de la zone d'étude, nous soustrayons les zones non éligibles dues à diverses contraintes réglementaires et matérielles. Ces dernières sont de trois types :

- Les contraintes environnementales sont définies par des espaces réglementés tels que les espaces de protection de l'environnement. Pour la France : les zones Natura 2000, les zones soumises à un arrêté de protection biotope, les ZNIEFF de type 1 et 2, les ZICO, les zones sensibles, et les trames vertes et bleues.
- Les contraintes physiques, étant donné que nous nous basons sur du grand éolien, une distance de 500m par rapport aux bâtiments est à prendre en compte.
- Enfin, les contraintes techniques liées aux grands réseaux routiers, ferroviaires et électrique. Ainsi, une distance de sécurité de 200m par rapport à ces axes a été prise en compte.

c.f 1.2 Zones éligibles pour l'implantation d'éoliennes sur le territoire du Grand Lyon

¹⁶ Système d'Information Géographique

► Energie solaire

On obtient la production d'énergie solaire, selon le calcul technique, présenté en **Fig 7**: Potentiel de production en puissance d'énergie solaire à chaque instant t, qui multiplie la surface de panneaux solaires S_s , par le rayonnement solaire γ , et par le rendement des panneaux ρ_p .

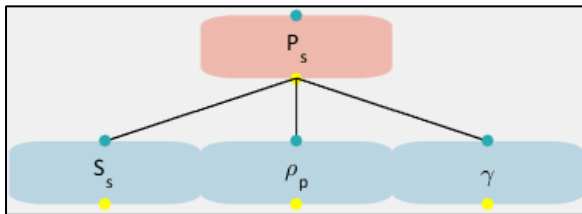


Fig 7: Potentiel de production en puissance d'énergie solaire à chaque instant t

Source : I. RICAUD, M. SICILIA – toaster Systems© (M. Maizia)

Nomenclature

Variable	Unité	Définition
P_s	W	Potentiel de production en puissance d'énergie solaire à chaque instant t pour chaque lieu de production s
S_s	m ²	Surfaces des zones éligibles s à l'installation de panneaux solaires
ρ_p	-	Rendement des panneaux solaires
γ	W/m ²	Rayonnement solaire sur le territoire

La surface de panneaux solaires, dépend de la surface utile des toits des bâtiments éligibles.

Dans un premier temps, il faut déterminer les bâtiments éligibles selon les contraintes réglementaires auxquelles sont soumis les panneaux solaires. Ainsi, par l'intermédiaire du SIG, nous avons retirés les bâtiments situés au niveau des sites classés, inscrits et dans les ZPPAUP, ainsi que les bâtiments proches de ces zones dans un rayon de 500 m.

Ensuite, il faut déterminer la surface utile des toits de cette sélection de bâtiments. Selon l'article scientifique « Solar energy potential of roofs on urban level based on building typology »¹⁷ de M.Horvátha, D.Kassai-Szoób, et T.Csoknyaia, paru en Novembre 2015, il a été établi que **2.75%** de la surface totale de toiture d'une ville était éligible à l'installation de panneaux solaires. Ce pourcentage est établi à partir de la typologie des bâtiments de la ville. Il tient compte des composants techniques du toit (typologie de bâtiment, orientation, cheminée, inclinaison des toits etc...) ainsi que du facteur d'ombrage et d'environnement. De cette manière, nous pouvons obtenir la surface utile de toit éligible à l'installation de panneaux solaires. Cependant, nous ne pouvons employer cette méthode sans adaptation pour représenter d'un point de vue spatiale un Tepos. En effet, étant donné que nous recherchons à spatialiser un Tepos, nous ne pouvons pas considérer que seulement 2.75% de la surface des toits est utile, cela ne nous semble pas réaliste. Ainsi, nous avons choisi de sélectionner certains bâtiments selon leur hauteur. En d'autres termes, nous sélectionnons les bâtiments les plus élevés verticalement jusqu'à obtenir 2.75% de la surface totale des toits du territoire, à travers le SIG (c.f **1.3 Bâtiments éligibles à l'installation de panneaux solaires sur le territoire du Grand Lyon**).

3.4 Distance entre les lieux de production et les lieux de consommation

Les relations qui existent entre les coordonnées des lieux de production et celles des lieux de consommation, pour calculer la distance, sont présentées en **Fig 8**: Système permettant de calculer la distance qui sépare les lieux de consommation et les lieux de production.

La formule mathématique qui permet de déterminer la distance entre deux points de coordonnées (x ; y), en

Km, est la suivante : $D_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \times 0.001$

Quant aux coordonnées, elles sont déterminées par l'intermédiaire du SIG.

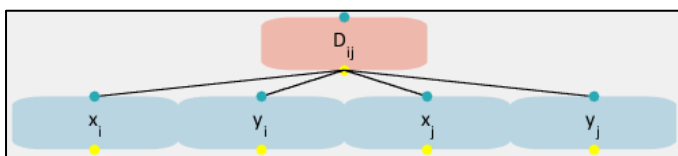


Fig 8: Système permettant de calculer la distance qui sépare les lieux de consommation et les lieux de production

Source : I. RICAUD, M. SICILIA – toaster Systems© (M. MAIZIA)

Nomenclature

Variable	Unité	Définition
D_{ij}	Km	Distance entre les points de production j et les points de consommation i
x_i	m	Coordonnée x des zones de consommation i
y_i	m	Coordonnée y des zones de consommation i
x_j	m	Coordonnée x des points de production j
y_j	m	Coordonnée y des points de production j

¹⁷ Source : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881530400X>

CAS D'ETUDE SUR LE GRAND LYON

1. Application & résultats

Pour mettre en application le système que nous avons élaboré, nous avons choisi la Métropole du Grand Lyon comme terrain d'étude. Nous voulions prendre un territoire fortement urbanisé car c'est ce type d'habitat qui tend à croître actuellement et qui présente les principales problématiques en termes d'approvisionnement en énergie.

L'urbanisation entraîne l'artificialisation des sols ainsi que le développement d'une densité de bâti plus importante. Ces éléments génèrent des contraintes techniques ou sécuritaires pour les infrastructures à mettre en place pour la production d'énergie renouvelable.

D'autre part, le modèle des Métropoles urbaines est un modèle qui est plébiscité par les instances décisionnaires en France, notamment avec la loi MAPTAM¹⁸ de Janvier 2014. Il s'agit d'un modèle qui vise à donner un nombre plus important de compétences aux métropoles afin de leur permettre de développer plus facilement leur territoire. Sur le plan de l'urbanisation cela se traduira par le développement et la densification sur le territoire de la Métropole pouvant s'étaler progressivement sur le territoire qui l'entoure. Ces deux phénomènes seront nécessairement accompagnés d'une augmentation des besoins en énergie, or avec la volonté d'effectuer une transition énergétique, on peut s'interroger sur la cohérence entre le TEPOS et le territoire d'une Métropole.

Lorsque l'on fait tourner notre système des besoins des appareils électriques, on obtient des valeurs de besoins proportionnelles à la surface des pôles ou des bâtiments du territoire (c.f **1.1 Pôles de besoins d'énergie du territoire du Grand Lyon**). Cette relation peut être critiquable, dans le sens où il est possible d'avoir une grande surface et peu d'appareils électriques nécessitant de l'énergie. On obtient des besoins qui nécessitent des ouvrages délivrant une puissance de l'ordre de 100kW à 1MW globalement. Ce niveau de puissance requis est cohérent avec le territoire d'étude que l'on a.

On ne peut pas faire de scénarios seulement avec ce système car les variables exogènes sont issues de données collectées et il est difficile de faire varier la surface des bâtiments déjà construits. On aurait pu faire un recensement des appareils électriques et de leurs consommations pour chacun des bâtiments, mais cette approche semble intrusive et compliquée à mettre en œuvre. Au contraire, notre approche permet dans le pire des cas de surévaluer les besoins et donc de mettre en place des ouvrages produisant plus d'énergie que ce que l'on a réellement besoin.

Le lancement du système des points de production nous permet de voir que c'est ici que se trouvent nos leviers. En effet, on peut agir sur les infrastructures de production d'énergie en choisissant des ouvrages avec un rendement plus important ou bien en augmentant leur nombre. Dans le cas de notre système de production, nos trois leviers sont : le rendement des panneaux photovoltaïques, celui des éoliennes ainsi que leur diamètre. En faisant fonctionner notre système seul, on obtient des puissances générées de l'ordre de 10 à 100kW, ce qui est beaucoup moins que la puissance dont nos bâtiments ont besoin (c.f **1.2 Zones éligibles pour l'implantation d'éoliennes sur le territoire du Grand Lyon & 1.3 Bâtiments éligibles à l'installation de panneaux solaires sur le territoire du Grand Lyon**).

Le fait est que nos systèmes fonctionnent sur les plans relationnels/logiques et mathématiques, lorsque l'on intègre nos systèmes au système Smartcity© (Mindjid Maizia), le logiciel peut effectuer les calculs en suivant les codes des programmes. On peut donc lancer le système et ensuite mettre en place des scénarios pour déterminer quelles sont les conditions opérationnelles du TEPOS.

Comme on aurait pu s'y attendre avec les ordres de grandeurs différents entre la puissance requise et la puissance produite, aucun bâtiment ou pôle n'est relié à un lieu de production. Ceci signifie qu'à aucun moment l'un de nos lieux de production n'est en mesure de répondre aux besoins électriques de l'un de nos pôles ou de nos bâtiments. Quel que soit le diamètre de nos éoliennes, leur rendement ou celui des panneaux photovoltaïques, on n'atteint jamais à aucun moment le TEPOS.

On en déduit que soit le TEPOS n'est pas envisageable sur notre territoire avec seulement de l'éolien et du photovoltaïque, ou alors qu'il y a un problème dans notre système qui n'affecte pas les relations logiques mais qui pose un souci dans nos calculs.

Dans un premier temps nous avons utilisé des pôles de besoins. Ainsi chaque pôle, qui est constitué de plusieurs bâtiments, avait une surface associée très importante et donc des besoins plus importants. Par conséquent nous avons pensé que c'était la raison pour laquelle les lieux de production ne pouvaient pas produire suffisamment.

¹⁸ MAPTAM : Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d'Affirmation des Métropoles

Cependant, même en repassant à l'échelle des bâtiments puis en faisant une restriction à 25% des bâtiments du territoire, on ne réussit toujours pas à associer un lieu de production à un bâtiment.

Même si l'on n'arrive pas à obtenir de TEPOS, on arrive à cibler l'un des principaux problèmes : la production n'est pas suffisante, à chaque instant, pour satisfaire les besoins électriques du territoire. Un autre problème que l'on peut soulever est la variabilité de notre production, ce qui est dû aux variations de la météo et du temps. Ce type d'ouvrages permettant de produire de l'énergie n'assure pas une production constante dans le temps.

2. Grands enseignements de l'étude

2.1 Limites du modèle

Le modèle ne permet pas d'établir un TEPOS car la production d'énergie est trop faible et discontinue. Ceci est causé par trois facteurs.

Le premier, et le plus important, est lié au pourcentage appliqué pour définir la surface éligible à l'installation de panneaux solaires. Il n'est pas représentatif du potentiel énergétique solaire de l'agglomération, puisqu'il permet d'obtenir une capacité selon un point de vue comptable, et non localisé. En effet, il n'est pas assez réaliste d'avoir uniquement 2.75% de surface utile par toit, ni de sélectionner les surfaces de toits les plus élevés jusqu'à atteindre 2.75% de la surface totale de toiture de l'agglomération. En effet, ses bâtiments ne sont pas forcément bien exposés. De plus, la quantité est très faible comparée à des projets similaires en France qui se rapprochent des 30% de surface utile de toit.

Deuxièmement, la production en EnR existante du territoire n'a pas été prise en compte, et pourrait être ajoutée.

Enfin, les technologies d'EnR sélectionnées sont insuffisantes étant donné que dans un premier temps nous sommes concentrés sur l'éolien et le solaire.

De plus, le stockage de l'énergie n'a pas été pris en compte. Hors, si on amplifie la production et qu'on produit plus qu'on ne consomme d'énergie le jour, alors on peut stocker cette surproduction. Et ainsi, consommer hors période de production, comme la nuit ou hors période de vent.

Par ailleurs, on peut souligner que les besoins énergétiques sont élevés, malgré le fait que les besoins thermiques ont été écartés volontairement, afin d'optimiser les rendements. Quant au volume des besoins, il est normalisé, et non différencié selon le type d'activité du bâtiment (logements, commerces, bureaux etc...). De plus, la zone d'étude est très urbanisée. Par conséquent, la surface à approvisionner est élevée, et la surface disponible pour les EnR type éolienne est donc faible.

En conclusion, ce modèle systémique admet pour limite principale la méthode de sélection des bâtiments éligibles, qui dépend de leur localisation. Ainsi, cela pose la question de savoir de quelle manière sélectionner les bâtiments ou les zones, éligibles à l'installation d'EnR, uniquement via des calculs mathématiques ?

2.2 Verrous méthodologiques

Afin de muscler la production, il est possible d'agir sur trois axes principaux. En premier lieu, augmenter la surface éligible à l'installation de panneaux solaires, ensuite, inclure les lieux de production d'EnR existant sur le territoire, et enfin, développer le mix énergétique en diversifiant les types d'EnR.

► Augmenter la surface éligible à l'installation de panneaux solaires

1) Intégrer un calcul de sélection des bâtiments éligibles à l'installation de panneaux solaires

Tout d'abord, modifier la méthode de sélection des bâtiments éligibles à l'installation de panneaux solaires est le premier facteur qui permettra d'amplifier la production d'énergie.

Pour qu'un bâtiment soit éligible trois éléments sont importants : l'orientation du toit du bâtiment, la pente de toit, et le facteur d'ombre portée sur ce bâtiment.

- L'orientation du toit peut être calculée selon l'angle entre le nord et le bord du toit le plus long.
- Le facteur d'ombre est fonction de la hauteur et de la proximité des bâtiments alentours ou de végétaux.
- La pente de toit peut être soit calculée, soit fixée selon la typologie de bâtiment.

Ensuite, afin de déterminer le pourcentage de surface utile d'un toit, il faudrait établir une typologie de bâtiment, spécifique au territoire. A grande échelle, deux méthodes ont été testées dans d'autres pays:

- Selon la méthode employée pour la Hongrie : elle divise la ville en plusieurs secteurs, et effectue une typologie de bâtiment sur 5% des bâtiments composants le secteur.
- Selon l'article « Study to examine the potential for solar energy utilization based on the relationship between urban morphology and solar radiation gain on building rooftops and wall surfaces »¹⁹ par H.Takebayashi, E.Ishii, M.Moriyama, A.Sakaki, S.Nakajima, et H.Ueda, une méthode employée au Japon. Le procédé consiste à établir des typologies de bâtiments selon l'activité du bâtiment (commerce, industriel, logement etc...) et d'en déduire le pourcentage de surface utile selon les activités des bâtiments.

2) Diversifier les types de surfaces

Afin d'accroître la production solaire, une piste serait de diversifier le type de surface pour installer plus de panneaux solaires, toujours sous conditions d'une bonne exposition solaire. Par exemple les toits de parking, ou encore une technologie novatrice : les « solar roadways »²⁰ qui peut être appliquée sur toutes les surfaces imperméables permettant le déplacement tant des voiture que des cyclistes et même les piétons.

► Inclure les lieux de production d'EnR existants

De plus, nous n'avons pas pris en compte les lieux de production d'EnR existants. Il suffirait simplement de rajouter une variable pour la Production d'EnR existant en puissance, P_r . Et d'insérer les puissances pr par lieux de production réels, pour chaque instant t , δ .

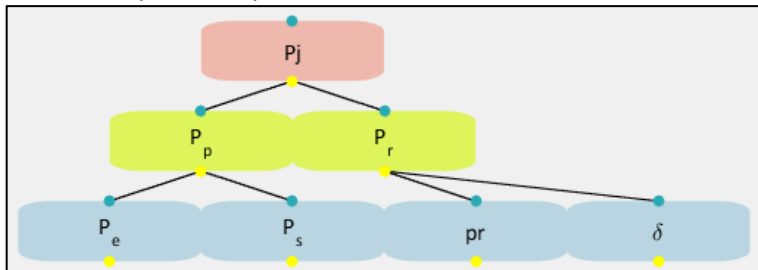


Fig 9: Système modifié permettant de calculer la production d'énergie, à chaque instant t et pour chacun des points de production

Source : I. RICAUD, M. SICILIA – toaster Systems© (M. Maizia)

Nomenclature

Variable	Unité	Définition
P_r	W	Production en puissance à chaque instant t pour chaque point de production existant r
pr	W	Production en puissance pour chaque point de production existant r
δ	heure	Heure de production d'énergie
P_j	W	Production en puissance à chaque instant t pour chaque point de production j
P_p	W	Potentiel de production en puissance à chaque instant t pour chaque point de production potentiel p
P_s	W	Potentiel de production en puissance d'énergie solaire à chaque instant t pour chaque lieu de production s
P_e	W	Potentiel de production en puissance d'énergie éolienne à chaque instant t pour chaque lieu de production e

► Développer le mix énergétique

En supplément, il serait possible de développer le mix énergétique selon le potentiel du territoire, comme l'hydroélectricité par exemple. Cela permettrait d'une part, d'augmenter la production. D'autre part, de compléter la production intermittente et ainsi combler les « vides » de production.

Par ailleurs, augmenter l'échelle du territoire permettrait d'avoir plus d'espaces potentiels à l'installation d'EnR. Toutefois, cela augmentera aussi les besoins à approvisionner.

► Amélioration du traitement des besoins pour une application en énergie thermique du modèle

Les pôles de besoins permettent la mutualisation des équipements de transport d'énergie d'un même point de production j à plusieurs points de consommation i . Ainsi, ils permettent de constituer des réseaux de chaleur. Par conséquent, une technique plus adaptée pour définir ces pôles, serait d'appliquer des polygones de Thiessen. Ce sont des polygones dont le centre de symétrie est située sur un bâtiment particulièrement plus consommateurs que les autres. Ainsi, ils permettent de regrouper les lieux de besoins autour de ce bâtiment pour générer des « pôles de besoin ».

¹⁹ Source : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15002996>

²⁰ Source : <http://www.solarroadways.com/>

CONCLUSION

En conclusion, pour obtenir un Tepos, les principaux leviers seraient de muscler la production d'énergie, principalement à travers le solaire, et bien évidemment de diminuer au maximum les consommations. Un constat récurrent.

Cependant, au niveau de la consommation d'énergie, notre étude n'a aucun contrôle, hormis de différencier le besoin selon le type d'activité du bâtiment (logement, commercial, industriel, bureaux etc...). Toutefois, valoriser l'adoption d'un comportement écologique, permettrait d'éviter le gaspillage d'énergie, et ainsi de ne pas compromettre l'avenir des générations futures.

Pourtant, ce système serait applicable dans d'autres cas. Par exemple, il serait possible de traiter de la même manière la répartition de l'énergie thermique. Il faudrait alors allouer un pourcentage pour répartir les surfaces entre les panneaux solaires thermiques et les panneaux photovoltaïques. Par ailleurs, il pourrait de même être adapté pour mettre en place une agriculture urbaine, ou encore pour traiter les déchets urbains. Il peut convenir à la plupart des domaines où il y a une production, et un acheminement vers une consommation.

Cette modélisation pourrait être améliorée dans un PFE par l'association de compétences de différents départements comme celui de l'informatique et de l'aménagement.

SOURCES

1. Bibliographie

1.1 Ouvrages électroniques

► Etat de l'art

Miklós Horvátha, Dominika Kassai-Szoób, Tamás Csoknyaia. - Solar energy potential of roofs on urban level based on building typology. - Novembre 2015

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881530400X>

Hideki Takebayashi, Etsuko Ishii, Masakazu Moriyama, Ai Sakaki, Shunsuke Nakajima, Hirobumi Ueda. - Study to examine the potential for solar energy utilization based on the relationship between urban morphology and solar radiation gain on building rooftops and wall surfaces. – Mai 2015

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15002996>

Melike Yalçın-Riollet, Isabelle Garabuau-Moussaoui, Mathilde Szuba. - Energy autonomy in Le Mené: A French case of grass roots innovation. – Novembre 2013

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421514001050?np=y>

► Divers

Marin David. - Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires. – Avril 2009

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00577097/document>

Ruiz Gomez Lina Maria. - Intégration de la production éolienne aux réseaux électriques : approches techniques et économiques.- Octobre 2012

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00844387v2/document>

1.2 Brochures techniques

Constructeur d'éoliennes Nordex

http://www.nordex-online.fr/fileadmin/MEDIA/Gamma/Nordex_Gamma_en.pdf

2. Webographie

2.1 Sources données Toaster

Constructeur d'éoliennes [Janvier 2016]

http://www.nordex-online.fr/index.php?id=886&no_cache=1&L=referenzen

Prévision météo [Janvier 2016]

<http://www.prevision-meteo.ch/climat/journalier/lyon-bron>

Réseau de Transport d'Electricité [Janvier 2016]

<http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-telechargement>

2.2 Sources SIG

DATA Grand Lyon [Janvier 2016]

<http://data.grandlyon.com/limitesadministratives/commune-du-grand-lyon-lieux-et-fdifices/>

DIREN Rhône Alpes [Janvier 2016]

http://www.rdbrmc-travaux.com/spge/site_v2/sous_rubrique.php3?id_rubrique=110

2.3 Divers

ADEME [Novembre 2015]

<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-energie-eolienne.pdf>

<http://www.ademe-poitou->

[charentes.fr/sites/default/files/files/Domaines%20d'intervention/Territoire%20et%20villes%20durables/TEPOS/TEPOS AAP Region ADEME diffusion.pdf](http://www.ademe-poitou-charentes.fr/sites/default/files/files/Domaines%20d'intervention/Territoire%20et%20villes%20durables/TEPOS/TEPOS AAP Region ADEME diffusion.pdf)

Bilan Electrique 2014, CETIM 50 [Novembre 2015]

<http://www.cetim.fr/fr/Mecatheque/Veille-technologique/Eoliennes-principe-de-la-transmission-par-multiplicateur>

CLER – Réseau pour la transition énergétique [Novembre 2015]

<http://www.cler.org/Des-TEPOS-100-renouvelables-c-est>

Commission de Régulation de l'Energie [Octobre 2015]

<http://www.cre.fr/international/union-europeenne/legislation#section5>

<http://www.cre.fr/reseaux/reseaux-publics-d-electricite/description-generale>

ERDF [Novembre 2015]

<http://www.erdf.fr/documents?page=1&types=11>

Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'énergie. [Octobre 2015]

http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/0-Expose_des_motifs.pdf

http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/chapitre_4.pdf

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Nucleaire-et-politique-energetique.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Feuille-de-route-pour-le,35233.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Qu-est-ce-que-l-eolien-flottant-en.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Chiffres-cles,38371.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Politique-de-developpement-des,13554.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Ce-que-dit-le-projet-de-loi-de.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Projet-de-loi-.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Energies-renouvelables,406-.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-conditions-techniques-de,21846.html>

RTE [Novembre 2015]

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/rte>

Smart Grids – CRE [Octobre 2015]

<http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=integrationenr-reglementation>

Solar Roadways [Avril 2016]

<http://www.solarroadways.com/>

Syndicat des énergies renouvelables [Novembre 2015]

http://www.enr.fr/userfiles/files/Brochures%20Eolien/SER_CarteEolien800x600-FR-20150130c.pdf

Territoires à énergie positive – 100% [Octobre 2015]

<http://www.territoires-energie-positive.fr>

<http://www.territoires-energie-positive.fr/reseau>

<http://www.territoires-energie-positive.fr/presentation/qu-est-ce-qu-un-territoire-a-energie-positive>

<http://www.100-res-communities.eu>

<http://www.territoires-energie-positive.fr/fre>

TI'EOLE – énergies éoliennes [Novembre 2015]

http://www.tieole.com/docs/petiteolien_rr.pdf

<http://www.tieole.com/index.cfm?pageid=32>

INDEX DES SIGLES & NOMENCLATURE

1. Nomenclature

Variable	Unité	Définition
a_i	-	Affectation de la zone de consommation i au point de production j le plus proche
D_{ij}	Km	Distance entre les points de production j et les points de consommation i
B_i	W	Besoins en puissance à chaque instant t pour chaque zone de consommation i
P_j	W	Production en puissance à chaque instant t pour chaque point de production j
b_i	W/m ²	Besoin unitaire en puissance à chaque instant t
S	m ²	Surface par zone de besoin i
x_i	m	Coordonnée x des zones de consommation i
y_i	m	Coordonnée y des zones de consommation i
x_j	m	Coordonnée x des points de production j
y_j	m	Coordonnée y des points de production j
P_s	W	Potentiel de production en puissance d'énergie solaire à chaque instant t pour chaque point de production s
P_e	W	Potentiel de production en puissance d'énergie éolienne à chaque instant t pour chaque point de production e
S_s	m ²	Surface des zones éligibles s à l'installation de panneaux solaires
ρ_p	-	Rendement des panneaux solaires
γ	W/m ²	Rayonnement solaire sur le territoire
n_e	Eolienne(s)	Nombre d'éoliennes envisageables
de	Eolienne(s)/m ²	Nombre d'éoliennes au m ²
S_e	m ²	Surface des zones éligibles e à l'implantation d'éoliennes
ω	m/s	Vitesse du vent
ϕ	m	Diamètre éolienne
ρ_e	-	Rendement éolienne

2. Sigles

- EnR : Energie Renouvelable
- GES : Gaz à Effet de Serre
- MAPTAM : Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d'Affirmation des Métropoles
- SIG : Système d'Information Géographique
- TEPOS : Territoire à énergie positive
- U.E : Union Européenne

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Fig 1: Mix Energétique de la France (13 juillet 2015)	6
Fig 2: Schéma de base de l'éolienne connecté au réseau.....	8
Fig 3: Système d'affectation du bâtiment i au point de production j le plus proche	10
Fig 4: Système présentant les relations fonctionnelles au sein du bâtiment pour les besoins électriques, à chaque instant t et pour chaque lieu de consommation i.....	11
Fig 5: Système calculant la production d'énergie, à chaque instant t et pour chacun des points de production.....	11
Fig 6: Potentiel de production en puissance d'énergie éolienne à chaque instant t.....	12
Fig 7: Potentiel de production en puissance d'énergie solaire à chaque instant t.....	13
Fig 8: Système permettant de calculer la distance qui sépare les lieux de consommation et les lieux de production .	13
Fig 9: Système modifié permettant de calculer la production d'énergie, à chaque instant t et pour chacun des points de production.....	16

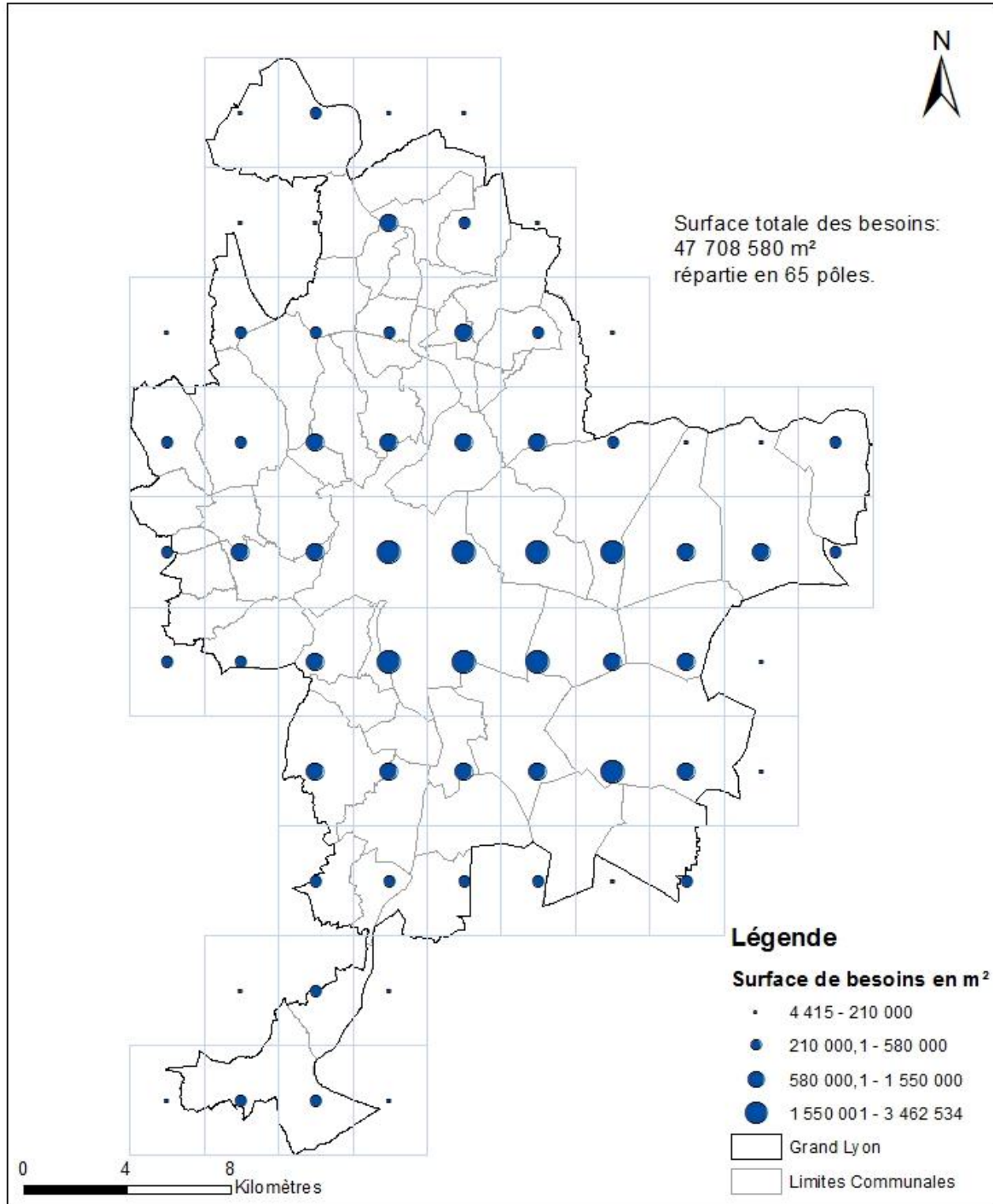
ANNEXES

1. Cartes.....	23
1.1 Pôles de besoins d'énergie du territoire du Grand Lyon.....	23
1.2 Zones éligibles pour l'implantation d'éoliennes sur le territoire du Grand Lyon.....	24
1.3 Bâtiments éligibles à l'installation de panneaux solaires sur le territoire du Grand Lyon.....	25
2. Codage des systèmes.....	26
2.1 Système production éolienne.....	26
2.2 Système production solaire.....	26
2.3 Système Pj.....	26
▶ Hors Production EnR existante.....	26
▶ Avec Production EnR existante.....	26
2.4 Système Tepos originale « Smartcity » de Mr Mindjid Maizia.....	26
2.5 Système de calcul des besoins d'énergie Bi.....	26
2.6 Système de calcul de la distance Dij, entre les Pj et les Bi.....	26

1. Cartes

1.1 Pôles de besoins d'énergie du territoire du Grand Lyon

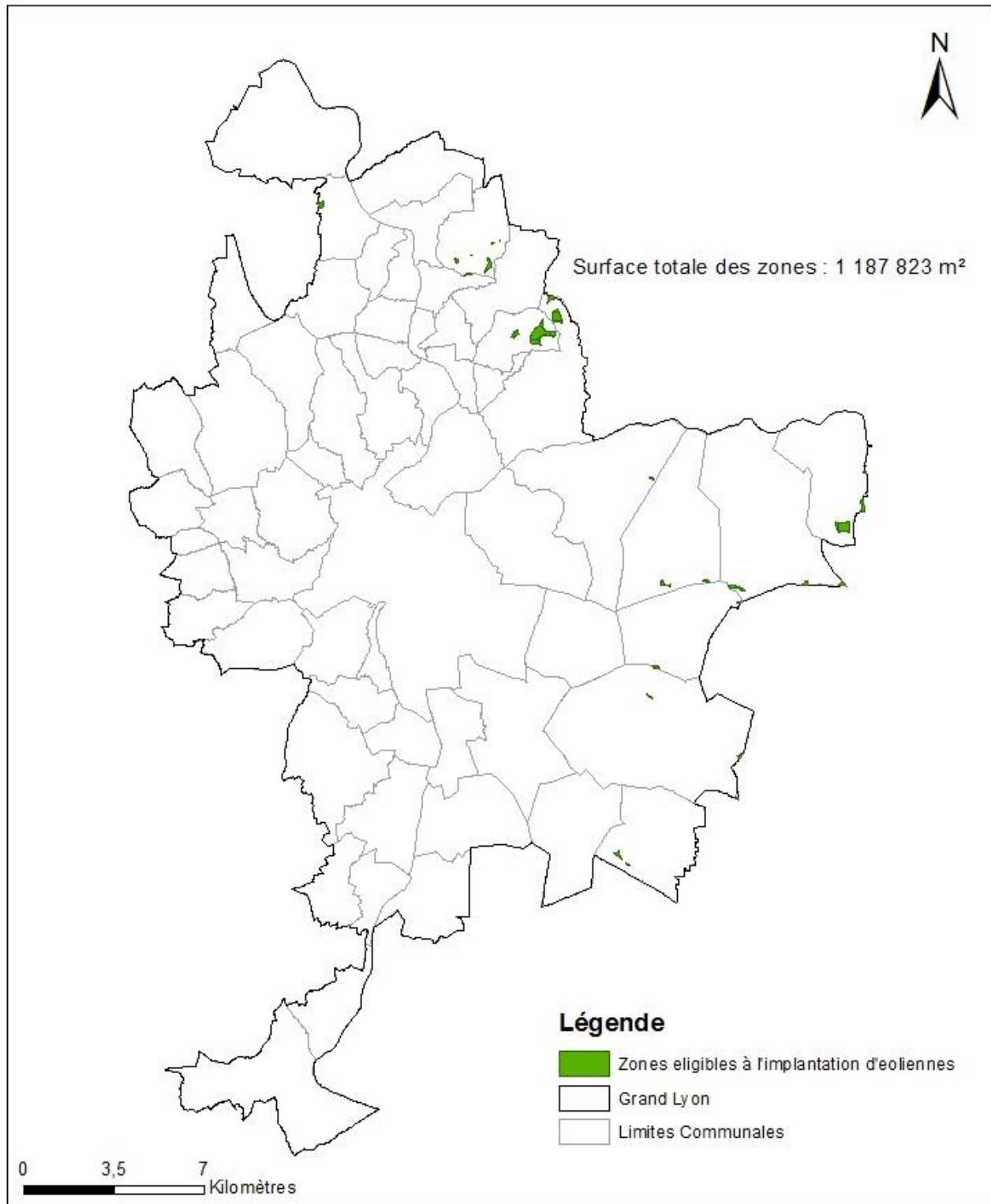
Pôles des besoins d'énergie électrique sur le territoire du Grand Lyon



Sources: IGN BD TOPO - DATA Grand Lyon - DIREN Rhône-Alpes
Auteurs: RICAUD - SICILIA
Réalisé sous ArcGis - Mars 2016

1.2 Zones éligibles pour l'implantation d'éoliennes sur le territoire du Grand Lyon

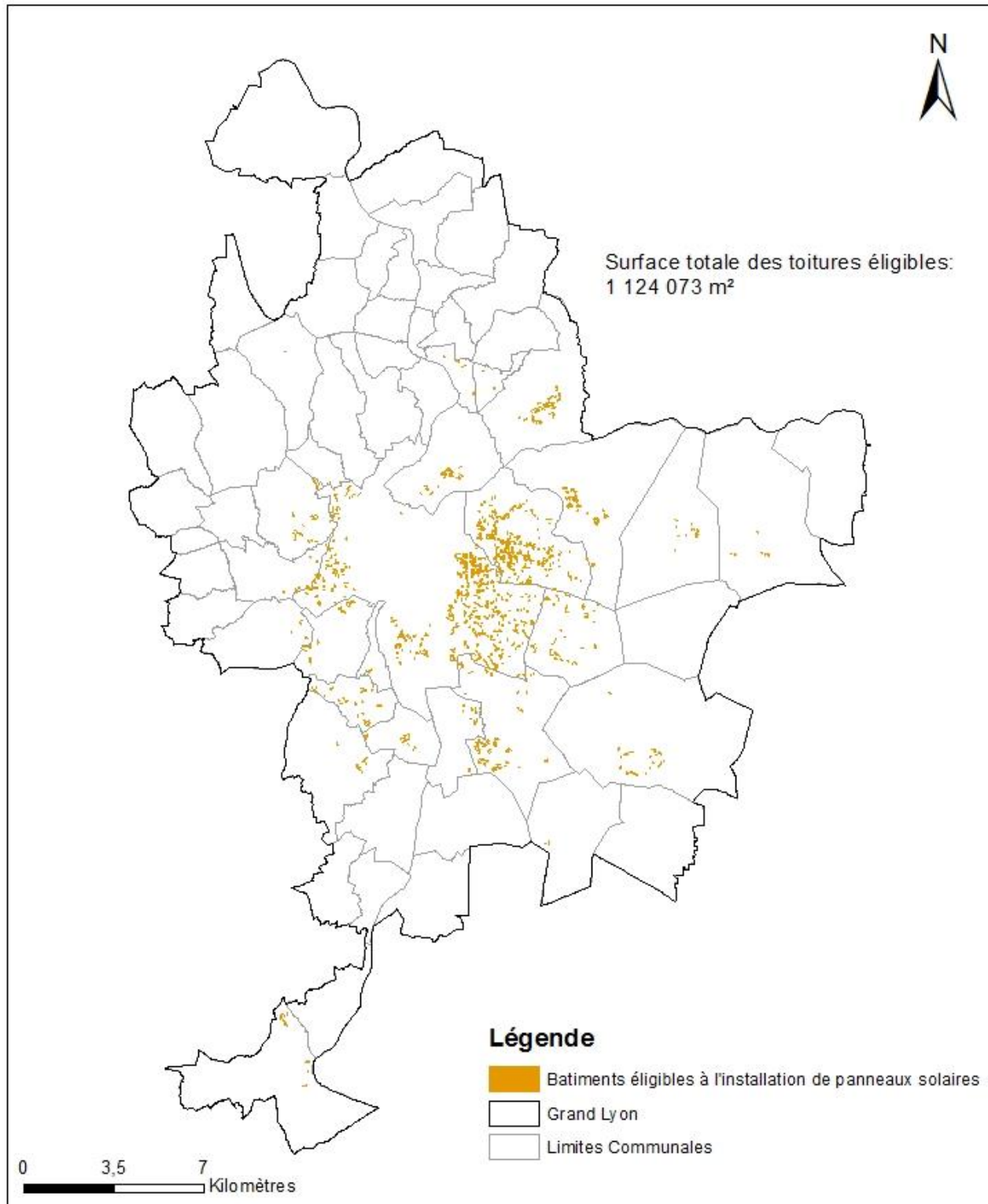
Zones éligibles pour l'implantation d'éoliennes sur le territoire du Grand Lyon



Sources: IGN BD TOPO - DATA Grand Lyon - DIREN Rhône-Alpes
Auteurs: RICAUD - SICILIA
Réalisé sous ArcGis - Mars 2016

1.3 Bâtiments éligibles à l'installation de panneaux solaires sur le territoire du Grand Lyon

Bâtiments éligibles à l'installation de panneaux solaires sur le territoire du Grand Lyon



Sources: IGN BD TOPO - DATA Grand Lyon - DIREN Rhône-Alpes
Auteurs: RICAUD - SICILIA
Réalisé sous ArcGis - Mars 2016

2. Codage des systèmes

2.1 Système production éolienne

3) Code de P_e

```
[ne,o]=meshgrid(n_e,omega);
```

```
P_e=rho_e.*Phi.*ne.*o;
```

4) Code de n_e

```
n_e=round(S_e*de);
```

5) Code de de

```
de=1/(15*Phi*Phi);
```

6) Code de S_e

```
S_e=Zone_e(:,3)
```

2.2 Système production solaire

1) Code de P_s

```
[S_s,g]=meshgrid(S_s,gamma);
```

```
P_s=S_s.*g.*rho_p
```

2) Code de S_s

```
S_s=Zone_s(:,3)
```

2.3 Système Pj

► Hors Production EnR existante

1) Code de Pj

```
Pj=P_p;
```

2) Code de P_p

```
P_p=[P_s,P_e];
```

► Avec Production EnR existante

1) Code de Pj

```
Pj=[P_p,P_r];
```

2) Code de P_p

```
P_p=[P_s,P_e];
```

3) Code de P_r

```
[p,d]=meshgrid(pr,delta);
```

```
P_r=d.*p;
```

2.4 Système Tepos originale « Smartcity » de Mr Mindjid Maizia

1) Code de ai

```
T=length(Pj(:,1));
```

```
nj=length(Pj(1,:));
```

```
ni=length(Bi(1,:));
```

```
[dij,prioritei]=sort(Dij);
```

```
[Pj,prioritej]=sort(Pj');
```

```
ai=inf(T,ni);
```

```
for t=1:T;
```

```
  j=prioritej(:,t);
```

```
  for k=1:nj;
```

```
    id=prioritei(:,j(k));
```

```
    idp=~isinf(ai(t,id));
```

```
    id(idp)=[];
```

```
    prod=cumsum(Bi(id));
```

```
    idp=find(prod
```

```
    id=id(idp);
```

```
    ai(t,id)=j(k);
```

```
    if sum(isinf(ai(t,:)))==0
```

```
      break
```

```
    end
```

```
  end
```

```
end
```

2.5 Système de calcul des besoins d'énergie Bi

1) Code de Bi

```
[s,b]=meshgrid(S,bi);
```

```
Bi=b.*s;
```

2.6 Système de calcul de la distance Dij, entre les Pj et les Bi

2) Code de Dij

```
[x_j,x_i]=meshgrid(x_j,x_i);
```

```
[y_j,y_i]=meshgrid(y_j,y_i);
```

```
Dij=(( (x_j-x_i).^2+(y_j-  
y_i).^2).^0.5).*0.001;
```

CITERES

UMR 6173
Cités,
Territoires,
Environnement
et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du
Projet
d'Aménagement
, Paysage,
Environnement



35 allée Ferdinand de Lesseps
BP 30553
37205 TOURS cedex 3

Directeur de recherche :
MAIZIA Mindjid

RICAUD Isabelle – SICILIA Morgane
Projet de Fin d'Etudes

DA5
2015-2016

TEPOS : Comment obtenir d'un point de vue spatial un Territoire à Energie Positive ?

Résumé :

Universellement, pour toutes les tâches quotidiennes, comme se nourrir, se déplacer et se chauffer, on utilise de l'énergie. En France, les énergies fossiles, tel le pétrole, prédominent. Cependant, d'une part, elles sont limitées, leurs stocks s'épuisent et d'autre part, elles participent activement au dérèglement climatique. Afin de limiter cet impact, il existe des solutions alternatives, comme les énergies renouvelables. A l'opposé, elles sont inépuisables et leur source, comme le soleil, est gratuite.

Toutefois, la gestion de ces énergies s'est développée d'un point de vue national et internationale, rendant ainsi les territoires interdépendants à grande échelle. De plus, selon les engagements pris par les pays membres de l'Union Européenne pour lutter efficacement contre le réchauffement climatique, le gouvernement pousse les collectivités à appliquer la transition énergétique.

C'est au sein de ce contexte, qu'est apparu la notion de TEPOS, un Territoire à Energie Positive, capable de produire autant, si ce n'est plus, d'énergie qu'il n'en consomme.

Ainsi, l'objectif de cette étude est double. D'une part, on souhaite spatialiser le transfert d'énergie entre producteur et consommateurs. Et d'autre part, on ambitionne de sélectionner les zones éligibles d'un territoire, à l'installation d'équipements créant de l'énergie, à partir de ressources durables. Ceci à une échelle plus restreinte, comme une communauté d'agglomération, tel le Grand Lyon. Afin d'atteindre cet idéal, nous employons une modélisation systémique.

Mots Clés : TEPOS, énergies renouvelables, solaire, éolien, reliaer.