

Etude de potentiel du développement de l'énergie solaire et éolienne et issue de l'incinération des déchets : cas de la métropole de Lyon et de la région Auvergne Rhône Alpes.

Mélanie Jourdain, Rova Rasoanaivo

Résumé

La stratégie « Europe 2020 » et la loi relative à la transition énergétique pour une croissance verte sont les lignes directrices de la métropole de Lyon et de la région Auvergne-Rhône-Alpes dans la lutte contre le réchauffement climatique. Notamment pour le développement de la production issue des énergies renouvelables. Ces territoires disposent d'un potentiel à développer afin d'atteindre leurs objectifs respectifs de production d'énergie renouvelable dans leur consommation finale. Le but de cet article est dans un premier temps de déterminer le potentiel de développement de l'énergie solaire, éolienne et issue de l'incinération des déchets. Puis d'étudier l'impact des choix techniques et logistiques que l'exploitation de ces potentiels impliquent. Les résultats démontrent qu'il existe un potentiel pour le solaire à l'échelle de la métropole et de la région, un potentiel pour l'éolien à l'échelle de la région et un potentiel d'incinération des déchets à l'échelle de la région.

I. Introduction

L'Union Européenne (UE) est un des plus grands consommateurs d'énergie et émetteur de gaz à effet de serre dans le monde. Dans sa stratégie « Europe 2020 », elle s'est fixée des objectifs, afin de développer une croissance « intelligente, durable et inclusive ».

Pour lutter contre le changement climatique, les 28 Etats membres se sont engagés, à travers le paquet climat-énergie, à atteindre trois objectifs : réduire de 20% les émissions de gaz à effet de serre, augmenter de 20% la part des énergies renouvelables dans notre consommation énergétique, et augmenter de 20% l'efficacité énergétique.

En accord avec la loi de transition énergétique établie par la France, la métropole de Lyon et la région Auvergne-Rhône-Alpes se sont fixé des objectifs dans la lutte contre le réchauffement climatique.¹

Notre précédent² article, prouve que ces territoires n'atteignent pas leurs propres objectifs. Néanmoins, il existe un potentiel de développement d'énergie renouvelable au sein de la métropole et de la région.

¹ Diagnostic Plan Climat Energie

² Mélanie Jourdain, Rova Rasoanaivo. La production d'énergie renouvelable dans les documents

Cet article se scinde en deux parties. La première partie porte sur l'étude du potentiel de développement de trois sources d'énergie renouvelable: l'énergie solaire, éolienne et issue de l'incinération des déchets. La seconde partie expose deux cas d'étude. L'étude de cas n°1 porte sur l'estimation de la production solaire et éolienne et évaluation par rapport aux objectifs du PCET. L'étude de cas n°2 porte sur l'impact de l'implantation d'une Usine d'Incinération des Ordures Ménagères (UIOM) sur la logistique de collecte dans la métropole de Lyon.

La première partie est organisée de la façon suivante. Suite à cette introduction, un énoncé du problème puis de la méthode de résolution employée sont présentés. La deuxième partie concerne plus précisément les études de cas : elles ont une structure semblable à la première partie, suivie des résultats et des principales conclusions.

II. Enoncé du problème et méthodologie

Chaque source d'énergie renouvelable dispose d'un potentiel de développement propre. Néanmoins, l'exploitation de ce potentiel dépend de plusieurs variables

L'estimation de la production d'énergie renouvelable éolienne et solaire peut se faire grâce à différentes méthodes. Par exemple dans le cas de l'éolien, Dabbaghiyan³ utilise la méthode de distribution de Weibull pour estimer le potentiel. Dans le cas du solaire, une méthode qui porte sur le calcul de disque solaire et qui prend en compte les données géométriques des bâtiments proches est possible. L'avantage de cette méthode est sa précision, mais elle est lourde en calculs et plus adaptée à l'étude d'un bâtiment ou d'un ensemble restreint de bâtiments. Dans cet article, l'estimation de la production d'énergie renouvelable et solaire est faite grâce aux courbes de charges de production solaire et éolienne fournies par RTE.

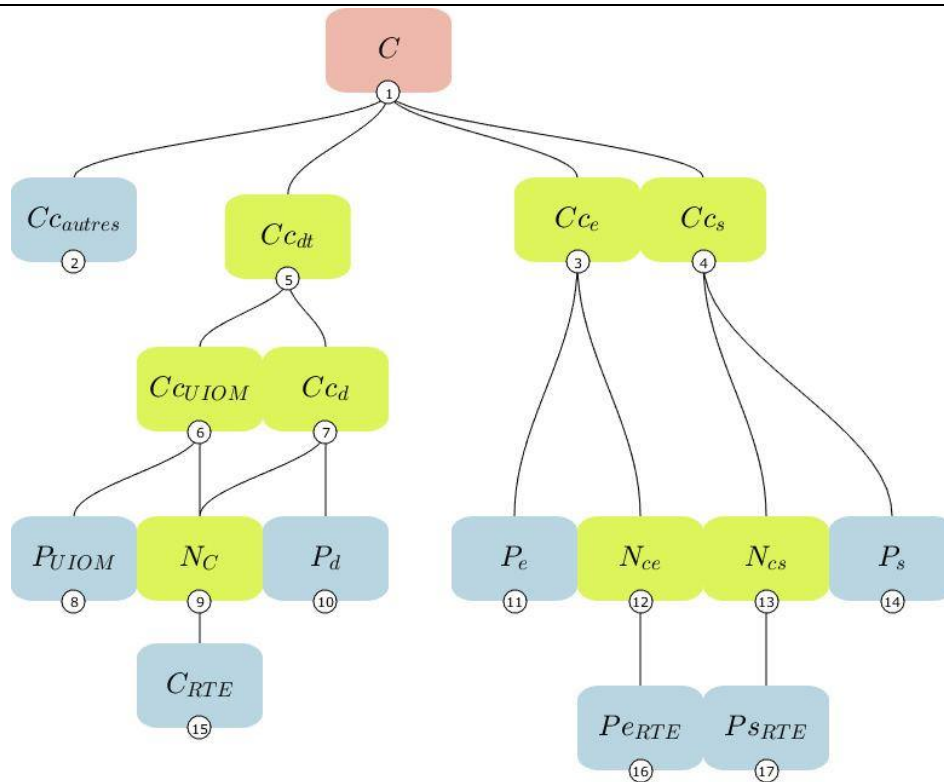
Le potentiel de développement de l'énergie issue de l'incinération des déchets dépend de la production d'ordures ménagères du territoire. A l'échelle de la métropole 99,6% des déchets collectés sont valorisés tandis qu'à l'échelle de la région ce taux est de 78,7%. Cette réalité amène donc à se positionner sur l'hypothèse suivante selon laquelle il existe un potentiel de développement uniquement à l'échelle régionale. Afin de démontrer la proportion de ce potentiel, une courbe de charge dynamique de la production énergétique actuelle des UIOM en fonction de la consommation relative doit être réalisée. Elle permet de déterminer la courbe de charge du tonnage de déchets valorisé et par conséquent la courbe de charge du tonnage de déchets non valorisé. Cette dernière courbe couplée au pouvoir calorifique inférieur (PCI) permet de déterminer la courbe de charge du potentiel de production énergétique issue de l'incinération des déchets.

Le logigramme suivant permet de modéliser ces courbes de charge.

² Mélanie Jourdain, Rova Rasoanaivo. La production d'énergie renouvelable dans les documents d'urbanisme et d'aménagement : cas de la métropole de Lyon et de la région Auvergne- Rhône-Alpes. Décembre 2017

³ Dabbaghiyan. [Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions May 2017, Pages 311-324]

Figure 1: Logigramme de la courbe de charge



La courbe de charge final (**C**) dépend de la courbe de charge de l'énergie éolienne (**C_{ce}**), solaire (**C_{cs}**) et issue de l'incinération des déchets (**C_{cdt}**).

La courbe de charge de l'éolien et du solaire, dépend des variables suivantes:

- **Pe_{RTE}** : correspond à la courbe de charge de l'éolien, fournie par RTE
- **Ps_{RTE}** : correspond à la courbe de charge de l'éolien, fournie par RTE
- **N_{ce}** : courbe normale liée à la courbe de charge de l'éolien. Elle est obtenue par division de la puissance à chaque instant par la puissance totale
- **N_{cs}** : courbe normale liée à la courbe de charge solaire. Elle est obtenue par division de la puissance à chaque instant par la puissance totale
- **Pe** : puissance installée éolien
- **Ps** : puissance installée solaire
- **C_{ce}** : courbe de charge de l'éolien. Correspond à la répartition de la puissance installée suivant la courbe normale.
- **C_{cs}** : courbe de charge solaire. Correspond à la répartition de la puissance installée suivant la courbe normale.

La courbe de production d'énergie issue de l'incinération des déchets dépend des variables suivantes :

- **C_{cdt}** : correspond à la courbe de charge totale du potentiel de production d'énergie d'incinération des déchets et s'obtient par la relation, **C_{cdt} = C_{cuIOM} + (C_{cd}*PCI⁴)**

⁴ Pouvoir Calorifique Inférieur

- **C_{cd}** : correspond à la courbe de charge de la production de déchet non valorisée et s'obtient par la relation, **C_{cd} = P_d * N_c**
- **C_{UIOM}** : correspond à la courbe de charge de la production d'énergie actuelle et s'obtient par la relation, **C_{UIOM} = P_{UIOM} * N_c**
- **P_{UIOM}** : correspond à déchets non valorisée sur le territoire
- **P_d** : correspond à la production d'énergie actuelle des UIOM sur le territoire
- **N_c** : correspond à la normale liée à la courbe de charge de consommation (**C_{RTE}**) elle est égale à la consommation à un instant t divisée par la consommation totale.
- **C_{RTE}** : correspond à la courbe de charge de consommation, fournie par RTE

Etudes de cas n°1 : Estimation de la production solaire et éolienne et évaluation par rapport aux objectifs du PCET

I. Introduction

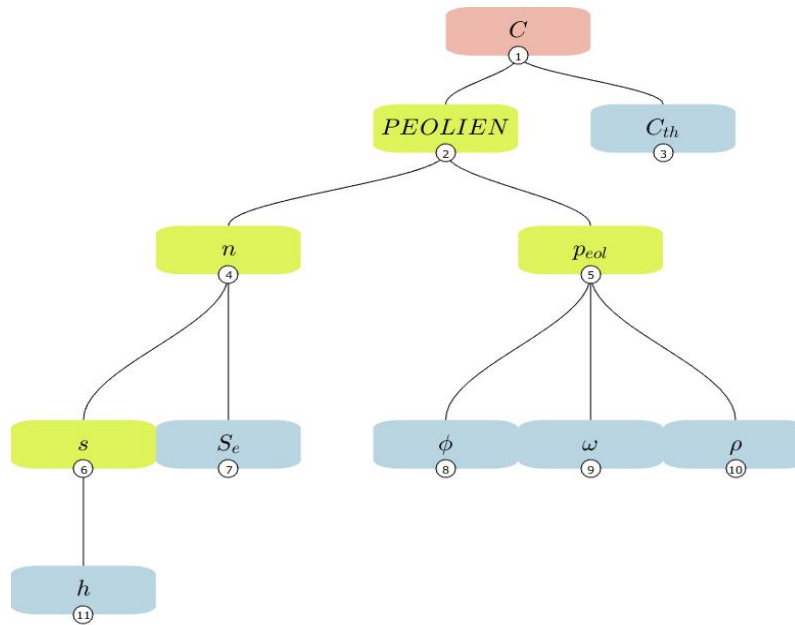
Dans un contexte de lutte contre le changement climatique, la métropole de Lyon et la région Auvergne Rhône Alpes sont engagés à atteindre trois objectifs, dont l'augmentation de la part d'énergie renouvelable dans la consommation finale, respectivement à 20% et 29% à l'horizon 2020. Les résultats de l'article précédent montrent que l'agglomération et la région ne sont pas en mesure d'atteindre leurs objectifs. Il leur manque respectivement une production de **1 776 GWh** et **6 473 GWh**. Cet article permet donc d'estimer la production d'énergie des filières éolienne et solaire, et vérifier si ces productions sont favorables aux objectifs du PCET.

II. Méthodologie

L'agglomération et la région ne sont pas en mesure d'atteindre leurs objectifs. On émet alors l'hypothèse qu'en développant les filières éolienne et solaire, ces territoires peuvent compléter la quantité de production manquante afin de parvenir à leurs objectifs. Pour évaluer dans quelles mesures ces territoires sont susceptibles d'atteindre leurs objectifs, une étude de potentiel de chaque énergie renouvelable est faite, avec une estimation de chaque production.

La méthode d'estimation de la production d'énergie renouvelable est différente selon la filière. Les logigrammes présentés ci-dessous sont génériques et peuvent s'appliquer à tous les territoires. Dans le cas de l'éolien, le logigramme ci-dessous permet d'obtenir la courbe de charge de la production et ainsi la production annuelle.

Figure 2: Logigramme de la courbe de charge de la production éolienne



La variable **C** correspond à la courbe de charge de la production éolienne. Elle représente la puissance générée par tranche de 30 minutes pendant une année. Elle s'obtient à partir d'une courbe de charge de production théorique **C_{th}**, fournie par RTE⁵, et la puissance installée **PEOLIEN**. La puissance installée dépend de la puissance d'une éolienne et du nombre d'éoliennes et s'obtient par la relation : **PEOLIEN** = **p_{eol}** * **n**. La puissance **p_{eol}** d'une éolienne est proportionnelle au diamètre **Φ** des pales, à la vitesse **ω** du vent et au rendement **ρ** de l'éolienne et s'obtient par la relation : **p_{eol}** = **ρ** * **0.37** * $\left(\frac{\pi}{4}\right) * \omega^3 * \Phi^2$.

Le nombre d'éoliennes dépend de la surface **Se** éligible pour l'installation des éoliennes ainsi que de la surface **s** nécessaire à l'installation de chaque éolienne. La surface **s** est proportionnelle à la hauteur du mat, et est définie par la relation : **s** = $((10 * h)^2) * \pi$. La détermination de la surface **Se** quant à elle se fait grâce au logiciel ArcGIS. L'identification de sites potentiels dépend de plusieurs contraintes :

- Une distance minimale de 500 mètres par rapport aux habitations
- Les zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF)⁶
- Les zones de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager (ZPPAUP)⁷
- Les servitudes et contraintes aériennes et terrestres⁸
- Le relief⁹.

Dans le cas du solaire, le logigramme ci-dessous permet d'obtenir la courbe de charge de la production et ainsi la production annuelle.

⁵ Réseau de transport d'électricité France

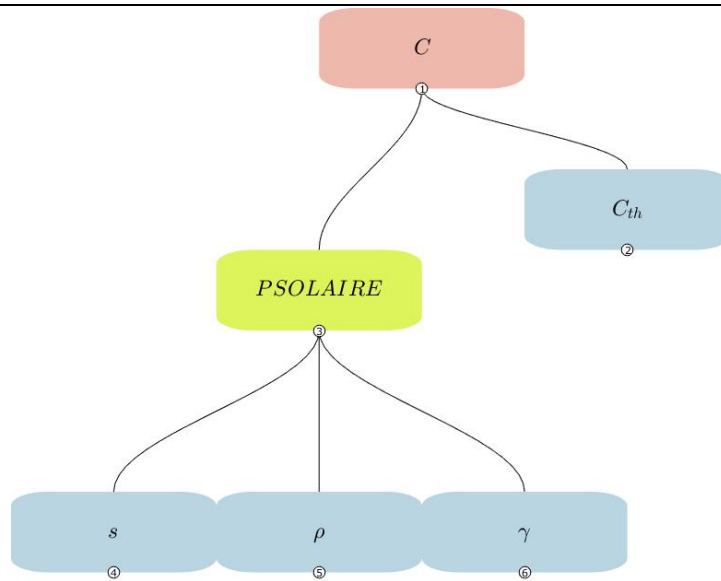
⁶ Les données concernant les ZNIEFF sont disponibles sur datagouv.fr

⁷ Les données concernant les ZPPAUP sont disponibles sur datagouv.fr

⁸ Les données concernant les servitudes et contraintes aériennes et terrestres sont disponibles sur datagouv.fr

⁹ Les données sont issues de la base de données Corine Land Cover

Figure 3: Logigramme de la courbe de charge de la production éolienne



La variable **C** correspond à la courbe de charge de la production solaire annuelle. Elle représente la puissance générée par tranche de 30 minutes pendant une année. Elle s'obtient grâce à une courbe de charge théorique C_{th} également fournie par RTE, et la puissance installée **PSOLAIRE**. La puissance installée **PSOLAIRE** est proportionnelle au rendement ρ des panneaux solaires, au rayonnement solaire γ et à la surface s d'installation des panneaux solaires photovoltaïques. Elle s'obtient par la relation : **PSOLAIRE** = $s * \rho * \gamma$. Dans cet article, seules les toitures de bâtiments sont considérées comme surface d'installation des panneaux solaires photovoltaïques. H. Wittmann, P. Bajons, M. Doneus, H. Friesinger prouvent que l'installation de panneaux solaires photovoltaïques sur les toits des bâtiments existants sont une ressource d'énergie renouvelable efficace et viable à l'échelle urbaine¹⁰. La détermination de cette surface se fait grâce au logiciel ArcGIS. Le but est de sélectionner les bâtiments éligibles à la pose de panneaux solaires.

Une couche contenant tous les bâtiments de l'agglomération est nécessaire pour la sélection des bâtiments éligibles. Pour cela, trois types de bâtis sont pris en compte :

- Le bâti indifférencié, qui correspond aux bâtiments de plus de 20 m² ne possédant pas de fonction particulière pouvant être décrit dans les autres classes de bâtiments surfaciques : bâtiments d'habitations, d'enseignement, bergerie, borie, bungalow, bureaux, chalet, garage individuel, bâtiments hospitaliers, immeubles collectifs, lavoirs couverts, musée, prison, refuge, villages de vacances.
- Le bâti remarquable, de plus de 20 m², possédant une fonction, contrairement aux bâtiments indifférenciés, et dont la fonction est autre qu'industrielle. Il s'agit des bâtiments administratifs, religieux, sportifs, et relatifs aux transports.
- Le bâti industriel, bâtiment de plus de 20m² à caractère industriel, commercial ou agricole.

¹⁰ H.Wittmann, P.Bajons, M.Doneus, H.Friesinger. Identification of roof areas suited for solar energy conversion systems May 1997, Pages 25-36

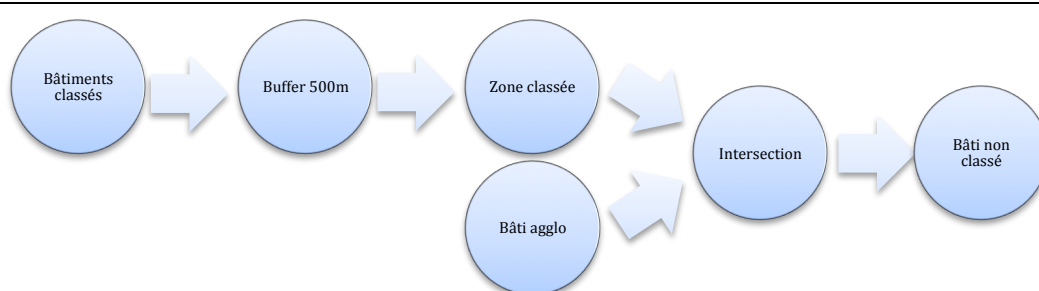
La combinaison de ces trois bases de données permet d'obtenir la couche bâti_agglo, correspondant à tous types de bâtiments confondus au sein de l'agglomération.

Les bâtiments avec des hauteurs aberrantes (0, 9999) ont été supprimés de la base de données.

Ensuite, on exclue les bâtiments dits « classés », correspondant aux édifices inscrits ou classés au titre de monuments historiques. Conformément à la réglementation en vigueur, il est nécessaire de créer une zone de protection autour de ces bâtiments, soit un rayon de 500 mètres. Sur le logiciel ArcGIS, on crée donc des buffers de 500 mètres. Ainsi, tous les bâtiments contenus dans ces buffers ne sont pas éligibles à l'installation de panneaux solaires.

La sélection des bâtis éligibles se traduit comme suit :

Figure 4: Méthode de sélection des bâtis



L'intersection de la couche Bâti_agglo avec les zones classées permet de supprimer l'ensemble des bâtiments non éligibles légalement.

La carte 1 en annexe montre un exemple de résultat de sélection sur ArcGIS.

III. Résultats

1. Agglomération de Lyon et département du Rhône

a. Éolien

En 2015, la production éolienne de l'agglomération est nulle. Le potentiel de développement de cette filière à l'échelle de la métropole est faible, du fait de la densité du territoire. En effet, en respectant la distance minimale de 500 mètres entre une habitation et une éolienne, le grand éolien n'a pas sa place sur le territoire du Grand Lyon. La carte 2 en annexe montre les zones non-éligibles à l'installation d'éoliennes. Cette sélection se base sur l'hypothèse de la distance minimale entre une habitation et une éolienne.

On suppose alors que la métropole peut être alimentée à partir de l'énergie éolienne produite par le département du Rhône. Par la suite, on élargit donc l'étude de potentiel au niveau départemental.

En tenant en compte les contraintes énoncées dans la méthodologie, à l'échelle du département, trois zones potentielles sont identifiées. La carte 3 en annexe illustre les zones éligibles à l'installation d'éoliennes.

Le tableau suivant regroupe ces zones et leurs surfaces.

Tableau 1: Surfaces éligibles

	Surface (m ²)
Zone potentielle 1	22 478 829
Zone potentielle 2	26 383 731
Zone potentielle 3	20 847 559
Surface totale	78 337 475

Avec une surface totale de **7 800 hectares**, on obtient une puissance installée de **3,9 MW** et une production annuelle de seulement **25 GWh**. Le nombre d'éoliennes installées varie selon le type d'éolienne. Le tableau suivant montre la puissance installée, le nombre d'éoliennes et la production annuelle selon le type d'éolienne.

Tableau 2: Production selon le type d'éolienne

Type d'éolienne	Puissance installée (MW)	Nombre d'éoliennes	Production (MWh)
70 m	3,9	50	25 075
125 m	3,9	15	25 075

En choisissant des éoliennes de 70 mètres, on peut en installer 50 contre seulement 15 pour les éoliennes de 125 mètres.

b. Solaire

En 2015, la production solaire de l'agglomération s'élève à 27 GWh, ce qui représente seulement 1,27% de la production d'énergie renouvelable.

Le tableau suivant recense les résultats de la sélection sur ArcGIS :

Tableau 3: Surface de toiture éligible à l'installation de panneaux photovoltaïques (Agglomération)

	Ensemble des bâtis	Bâtis classés	Bâtis non classés
	Surface (m ²)	Surface (m ²)	Surface (m ²)
Bâti indifférencié	31 890 740	12 253 422	19 637 918
Bâti industriel	14 467 463	2 500 839	11 966 624
Bâti remarquable	887 164	313 164	574 000
Total	47 245 367	15 067 425	32 177 942

Ce tableau montre que sur **47 245 367 m²** de surface de toitures, **32 177 942 m²** soit **68%** des toitures sont éligibles à l'installation de panneaux photovoltaïques.

Cependant, en moyenne, 81% de la surface totale du toit de chaque bâtiment correspond à la surface disponible pour l'installation de panneaux photovoltaïque¹¹.

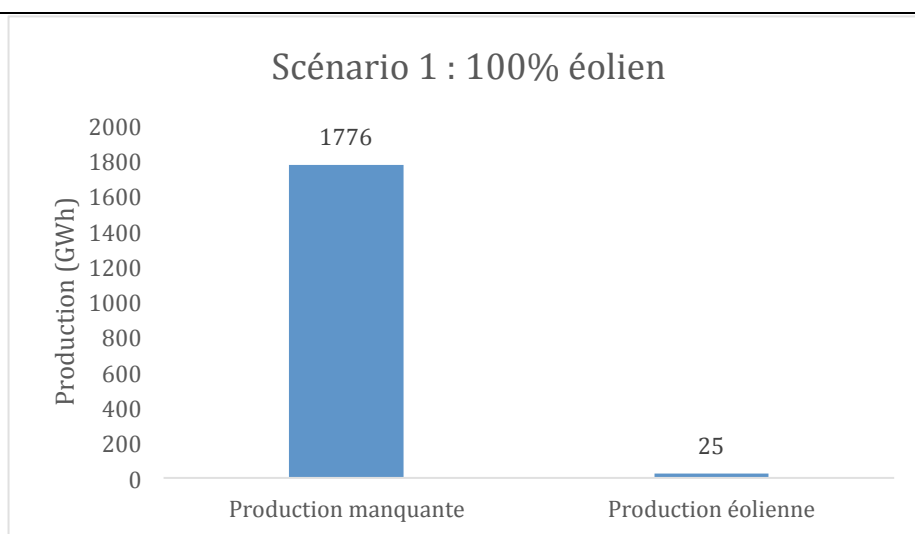
En prenant en compte cette valeur, on obtient une surface éligible de **26 064 133 m²**. En installant des panneaux photovoltaïques sur la totalité de cette surface, on obtient une production annuelle de **15 000 GWh**.

Deux scénarios sont établis pour vérifier si avec ces productions éoliennes et solaires, l'agglomération peut atteindre son objectif de porter la part d'énergie renouvelable à 20%.

Scénario 1 :

Ce scénario porte sur l'hypothèse qu'on comble le manque de production de l'agglomération de **1 776 GWh** avec une production 100% éolienne.

Figure 5: Scénario 1 : 100% éolien (Agglomération)



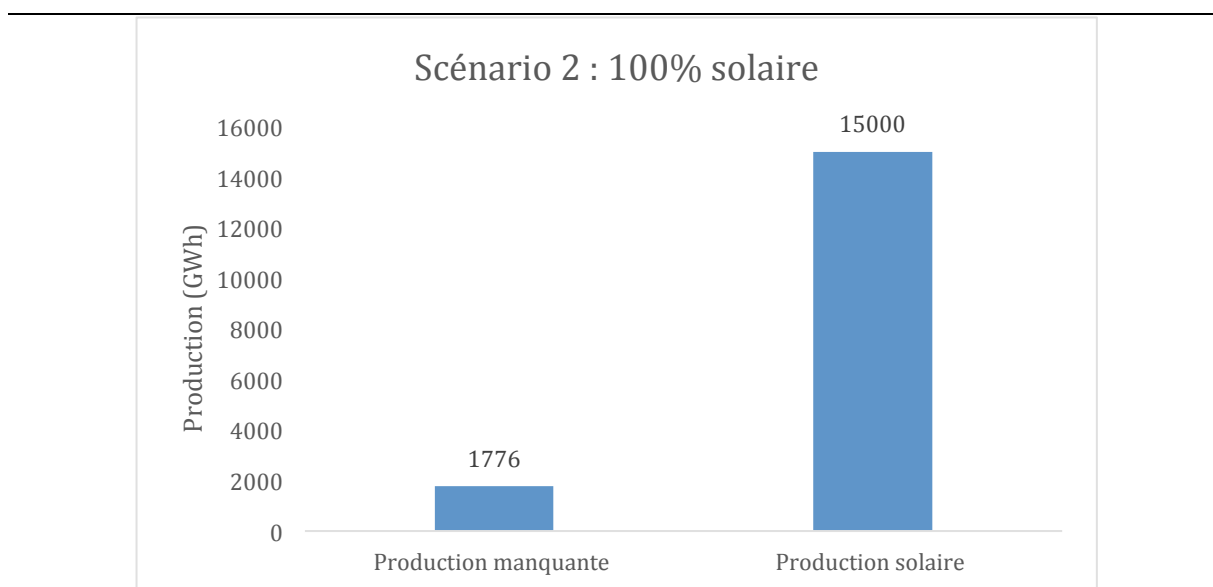
Le graphique ci dessus montre la production à rajouter pour atteindre l'objectif des 20% et la production éolienne estimée. La production éolienne ne couvre cependant que **1,4%** de la production manquante. Avec un scénario 100% éolien, il est impossible pour l'agglomération d'atteindre son objectif à l'horizon 2020.

Scénario 2 :

Ce scénario porte sur l'hypothèse qu'on comble le manque de production de l'agglomération de **1 776 GWh** avec une production 100% solaire.

¹¹ *Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: A machine learning approach*, Dan Assouline, Nahid Mohajeri, Jean-Louis Scartezzini. January 2017, Pages 278-296

Figure 6: Scénario 2 : 100% solaire (Agglomération)



Le graphique ci-dessus montre la production à rajouter pour atteindre l'objectif et la production solaire estimée. On peut voir que la production solaire estimée est neuf fois supérieure à la production manquante. En supposant que la production manquante ne sera comblée qu'avec de l'énergie solaire, il est possible de porter la part des énergies renouvelables à 20% d'ici 2020. Cela est faisable en ne couvrant que **12%** de la surface éligible sélectionnée précédemment, soit **3 086 000 m²**.

2. Région Auvergne Rhône Alpes

a. Eolien

En 2015, la production éolienne de la région Auvergne Rhône Alpes s'élève à 799 GWh. L'étude de potentiel éolien de la région montre que dix zones sont en mesure d'accueillir des parcs éoliens. Le tableau suivant permet de voir les surfaces de chaque zone.

Tableau 4: Surface des zones potentielles

Zone	Surface (m ²)
1	292 542 855
2	3 727 847 401
3	1 506 630 691
4	261 327 629
5	369 071 651
6	1 065 802 980
7	149 056 529
8	566 822 842
9	112 425 955
10	673 487 649

La carte 4 en annexe montre ces différentes zones.

Avec une surface éligible totale de **8 725 016 182 m²**, on estime une puissance totale installée de **443 MW** et une production annuelle de **2 820 GWh**. Le nombre d'éoliennes installées varie selon le type d'éolienne. Le tableau suivant montre la puissance installée, le nombre d'éoliennes et la production annuelle selon le type d'éolienne.

Type d'éolienne	Puissance installée (MW)	Nombre d'éoliennes	Production (GWh)
70 m	439	5667	2 820
125 m	439	1777	2 820

En choisissant des éoliennes de 70 mètres, on peut en installer plus de 5600 contre seulement 1700 pour les éoliennes de 125 mètres.

b. Solaire

En 2015, la production solaire de la région s'élève à **784 GWh**.

Le tableau suivant recense les résultats de la sélection sur ArcGIS :

Tableau 5: Surface de toiture éligible à l'installation de panneaux photovoltaïques (Région)

	Ensemble des bâtis	Bâtis classés	Bâtis non classés
	Surface (m ²)	Surface (m ²)	Surface (m ²)
Bâti indifférencié	321609518	118759044	202840473
Bâti industriel	141886552	24294737	116961814
Bâti remarquable	9459103	2932322	6526781
Total	472955174	146616104	326339070

Ce tableau montre que sur **472 955 174 m²** de surface de toitures, **326 339 070 m²** sont éligibles à l'installation de panneaux photovoltaïques.

Cependant, comme vu précédemment, en moyenne, 81% de la surface totale du toit de chaque bâtiment correspond à la surface disponible pour l'installation de panneaux photovoltaïque¹².

On obtient alors une nouvelle surface éligible de **264 334 647 m²**. En installant des panneaux photovoltaïques sur la totalité de cette surface, on estime une production annuelle de **189 TWh**.

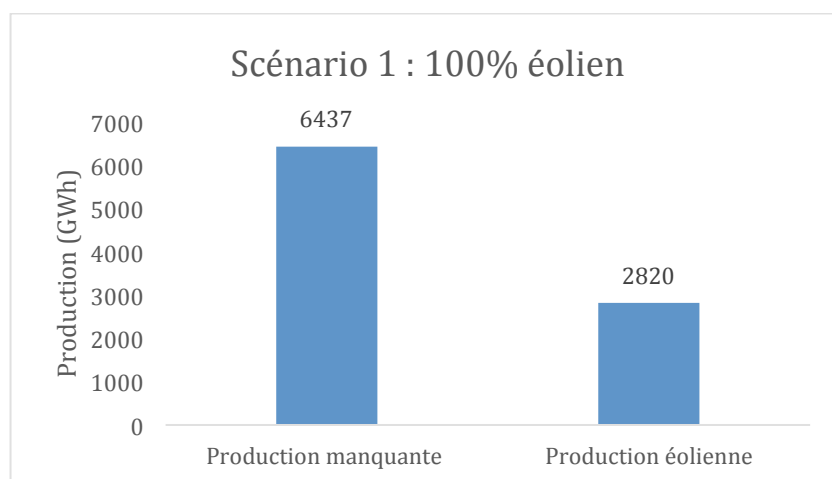
Comme dans le cas de l'agglomération, trois scénarios sont établis pour vérifier si avec ces productions éoliennes et solaires, la région peut atteindre son objectif de porter la part d'énergie renouvelable à 29%.

Scénario 1 :

Ce scénario porte sur l'hypothèse qu'on comble le manque de production de la région de **6 437 GWh** avec une production 100% éolienne.

¹² *Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: A machine learning approach*, Dan Assouline, Nahid Mohajeri, Jean-Louis Scartezzini. January 2017, Pages 278-296

Figure 7: Scénario 1 : 100% éolien (Région)

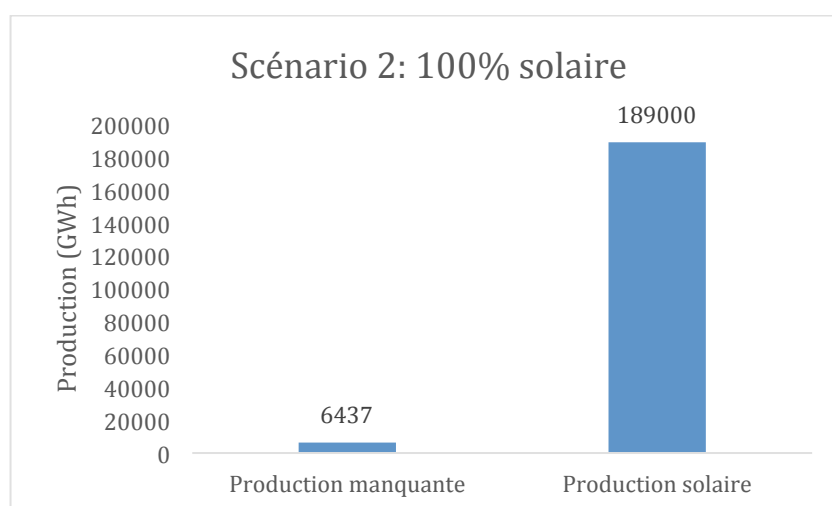


Le graphique ci dessus représente le premier scénario. Si on suppose que la production manquante est complétée avec une production 100% d'origine éolienne, elle n'est comblée qu'à hauteur de **43,8%**. L'éolien seul ne permet pas à la région de porter sa part de production d'énergie renouvelable à 29%.

Scénario 2 :

Ce scénario porte sur l'hypothèse qu'on comble le manque de production de la région de **6 437 GWh** avec une production 100% solaire.

Figure 8: Scénario 2 : 100% solaire (Région)



Le graphique ci-dessus représente le scénario 2. Si on considère que la production manquante est complétée avec une production 100% d'origine solaire, la région serait en mesure d'atteindre son objectif. Seulement **9 002 762 m²** de toitures sont nécessaires pour produire 6 437 GWh et permettre ainsi à la région de porter sa part de production d'énergie renouvelable à 29%.

IV. Conclusion

Deux études de potentiel du développement éolien et solaire sont faites à l'échelle de l'agglomération et la région. Pour ces deux territoires, le premier scénario ne semble pas être favorable pour l'atteinte de leurs objectifs. Néanmoins, le second scénario leur permet de compléter la production d'énergie renouvelable manquante et ainsi porter respectivement leur part d'énergie renouvelable, à 20% et 29%.

Cependant, la méthode utilisée pour l'étude de potentiel solaire se base uniquement sur la sélection de toits disponibles, en ne prenant que la protection des bâtiments classés comme contrainte. D'autres méthodes sont utilisables pour affiner la sélection de ces surfaces, notamment la sélection grâce à la typologie des toitures qui se fait grâce à d'autres logiciels. Dans ce cas, la surface éligible serait nettement plus faible et donc la production annuelle également.

Par ailleurs, les courbes de charge de production utilisées dans cet article, fournies par RTE, ne prennent en compte que les productions supérieures à 20MW.

Cette étude de potentiel nécessite d'être accompagnée par une étude d'impacts de ces installations sur les territoires, pour confirmer les zones éligibles.

Etudes de cas n°2 : Impact de l'implantation d'une UIOM sur la logistique de collecte dans la métropole de Lyon

I. INTRODUCTION

La première partie de cet article permet de démontrer que le potentiel de développement d'une UIOM propre au traitement des ordures de la métropole de Lyon ne se justifie pas. En effet, la proportion de déchet non valorisé et stocké représente environ 72 tonnes par jour soit 26 000 tonnes par an. Pour exemple, l'UIOM de Gerland Sud traite à elle seule 237 000 tonnes de déchet par an.

Néanmoins, l'étude de potentiel démontre que l'implantation d'une ou plusieurs UIOM en charge du traitement des ordures ménagères de la Région Auvergne-Rhône-Alpes est justifiée. En effet le tonnage de déchet non valorisé représente 2 195 tonnes. En théorie, il est donc possible d'implanter 4 UIOM de capacité semblable à l'UIOM de Gerland Sud.

L'article porte dans un premier temps sur le choix d'implantation d'une nouvelle UIOM. Puis sur les impacts de son implantation sur la modélisation du réseau de collecte de la Métropole de Lyon. Comment le parc de véhicule des différentes régies de ramassage va-t-il évoluer ?

II. ENONCE DU PROBLEME ET METHODOLOGIE

Afin que cette nouvelle UIOM capte le flux supplémentaire de déchet stocké de la métropole et profite du réseau de logistique, notamment la proximité des centres de tri de Rillieux-La-Pape et Saint-Fons. Son emplacement théorique se trouve dans la limite intérieure gauche de la métropole de Lyon à proximité immédiate du reste du

département. Les UIOM se situent en générale dans des zones spécifiques à forte densité mais qui dispose tout de même d'importants espaces libres.¹³

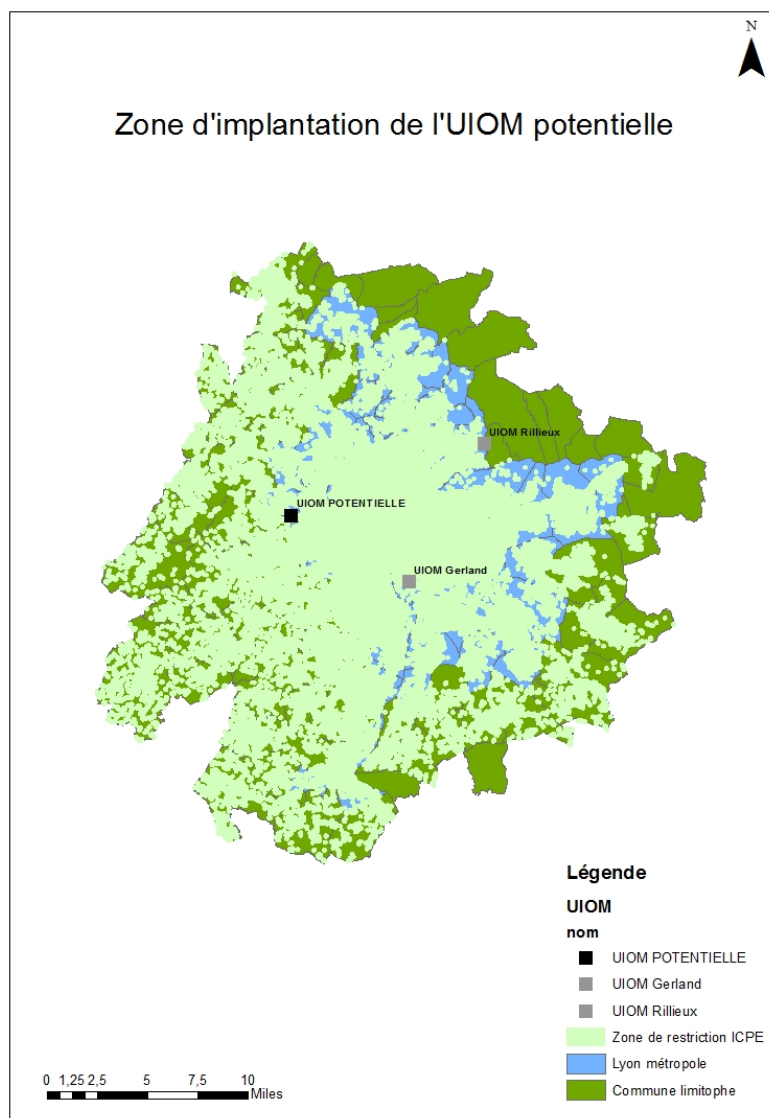
Même si, au sein de la métropole le tonnage capté par cette nouvelle UIOM est très faible, son implantation va obliger certaine régie de collecte à y réacheminer le surplus de déchets non valorisé. Ce changement peut conduire à une augmentation ou une diminution des temps de circuit et par conséquent une augmentation ou une réduction du parc de véhicule. Le but de cet article est donc de déterminer dans quelles mesures ce changement va s'opérer.

L'emplacement précis de l'UIOM est déterminé grâce à la transposition sur le logiciel de cartographie ArcGIS, des lois réglementaires en matière de distance de sécurité par rapport aux habitations. Les UIOM sont des Installation Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Pour toutes nouvelles constructions une distance de sécurité de 300 mètres doit être appliquée entre l'usine et le bâti existant.

La carte suivante représente les aires de protection de 300 mètres autour de l'ensemble des bâtis de la Métropole et des communes limitrophes. Les communes limitrophes sont prises en compte afin d'éviter les effets de bord.

Carte 1: Zone d'implantation de l'UIOM potentielle

¹³ Marie Lynn Miranda, Brack Hale, *Waste not, want not : the private and social costs of waste-to-energy production*. Energy Policy : Elseiver, May 1997



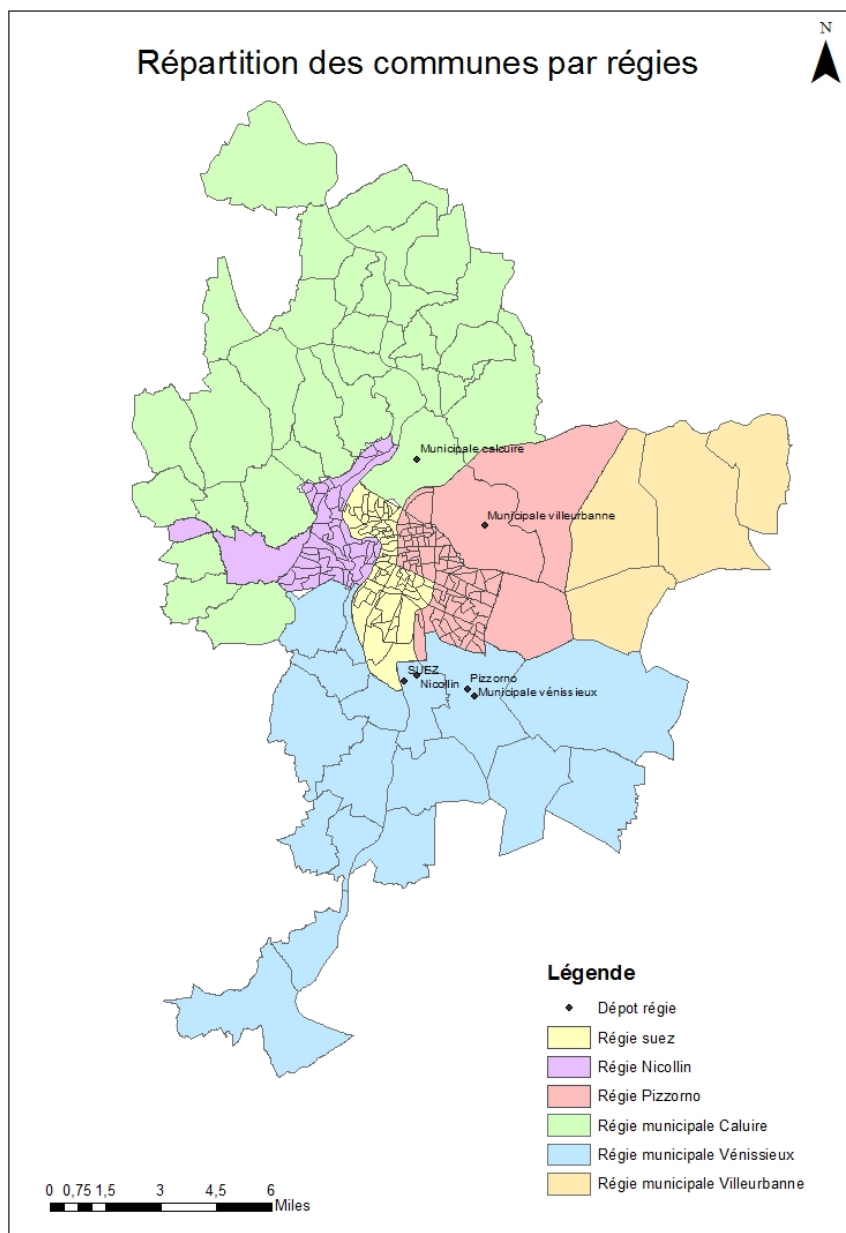
Source données : BDTPO. IGN

La collecte des ordures ménagères est assurée par quatre régies. Trois régies privées, les sociétés Suez, Pizzorno et Nicollin et la régie publique de la métropole. Chacune est en charge d'un territoire de collecte pré défini. La société SUEZ collecte Lyon (1^{er}), Lyon (2e), Lyon (4e) et Lyon (7e). La société PIZZORNO collecte Lyon (3e), Lyon (6e), Lyon (8e), Bron, Villeurbanne et Vaulx-en-Velin. La société NICOLLIN collecte Lyon (5e), Lyon (9e) et Tassin-la-Demi-Lune. Enfin la régie municipale qui est divisée en trois sous régies (Caluire et Cuire, Villeurbanne et Vénissieux) collecte les 54 communes restantes

L'affectation théorique des communes aux sous régies est effectuée en fonction de la distance temps la plus faible, affectée au réseau, entre le centroïde de la commune et le dépôt des sous régie. Afin de déterminer la distance temps un réseau topologique est créé. Il affecte une vitesse à chaque tronçon de réseau en fonction de son type (Autoroute, route à une chaussée..). Cette vitesse est déterminée au pire. Grâce à l'attribut longueur du tronçon il est possible de déterminer la durée de parcours de chaque tronçon.

La carte suivante représente la répartition des communes par régie.

Carte 2: Répartition des communes par régies



Source données : BDTOPO. IGN

Après avoir lié les communes à leurs régies respectives, il faut déterminer vers quelle UIOM ou centre de tri les déchets sont acheminés. Sur le territoire de la métropole de Lyon il existe deux UIOM (Gerland et Rillieux-La-Pape) et deux centres de tri (Rillieux-La-Pape et Saint-Fons). Dans un premier temps l'hypothèse suivante a été effectuée. « Chaque régie achemine ses déchets récoltés vers l'UIOM la plus proche en distance temps. »

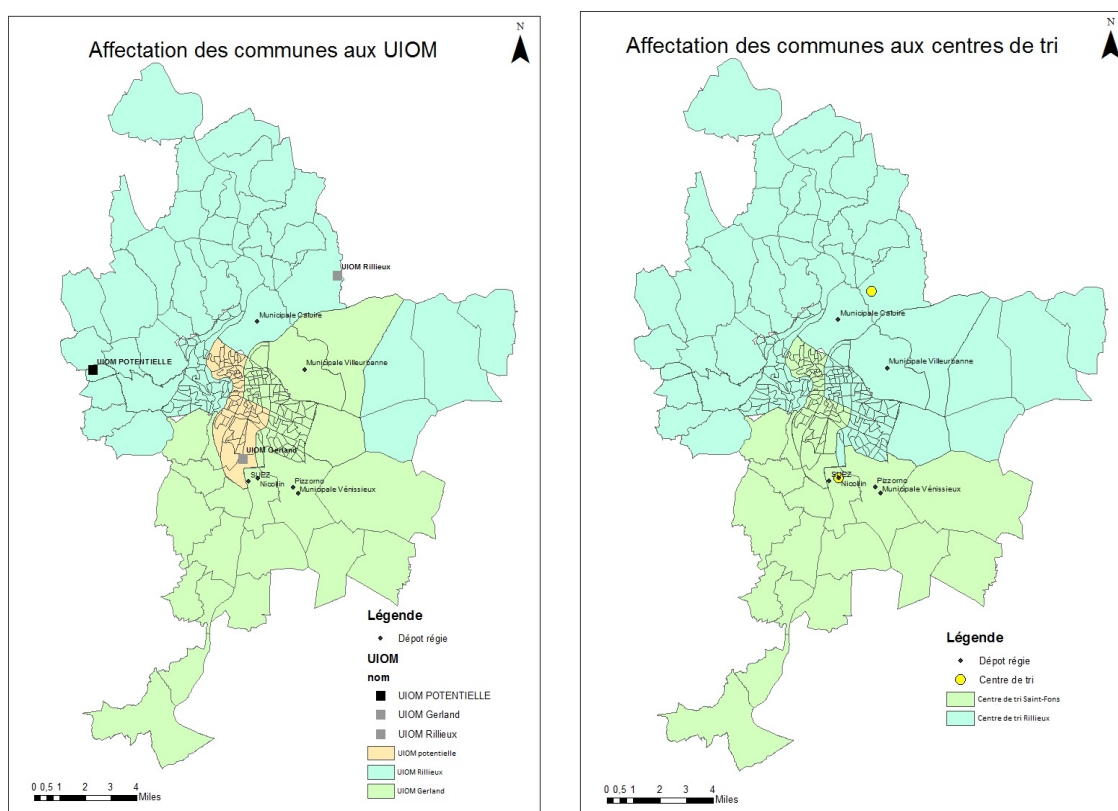
Dans un deuxième temps l'affectation régie-UIOM et régie-centre de tri est rééquilibrée en fonction de la capacité de traitement journalière des UIOM et des centres de tri.

Le tonnage journalier apporté par chaque régie est déterminé grâce au planning des jours de ramassage, par commune et par type de déchets. Les ordures ménagères sont acheminées vers les UIOM et la collecte sélective est acheminée vers les centres de tri. La population par commune est ensuite couplée à la production de déchets par habitant de Lyon métropole (environ 300Kg/hab/an pour les ordures ménagères). On obtient le tonnage de collecte journalier de chaque régie.

La première carte représente l'affectation aux l'UIOM et la seconde carte aux centres de tri. Cette affectation est déterminée par la distance temps la plus courte, corrigée par la capacité journalière de traitement des UIOM et des centres de tri.

Carte 3: Affectation des communes aux UIOM

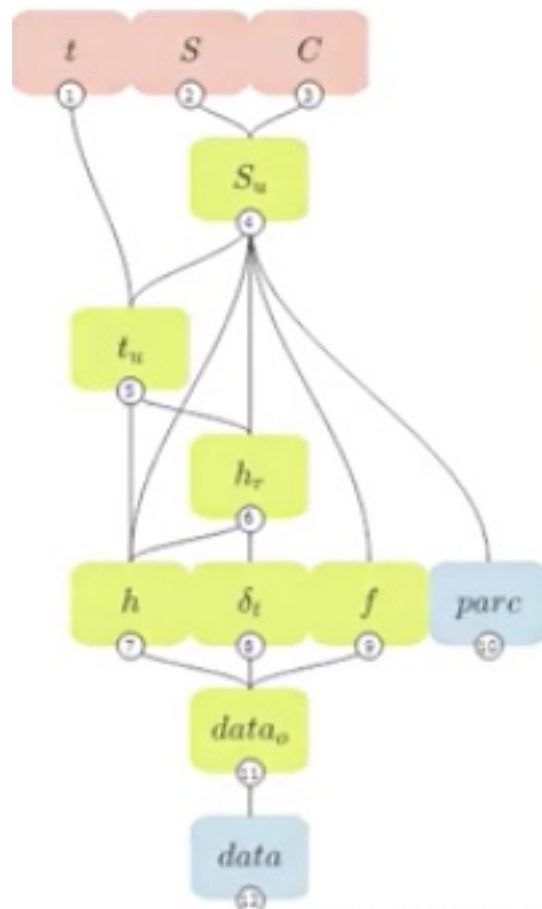
Carte 4: Affectation des communes aux centres de tri



Source données : BDTPO. IGN

Le nombre de véhicules optimal nécessaire à la réalisation de l'ensemble des tournées est modélisé grâce au logiciel Toaster carstock et l'outil Toaster Tool design. Le système logique est le suivant.

Figure 9: Logigramme carstock



Le stock (S) dépend de l'heure de départ de la flotte de véhicules (h), de la durée de la tournée (δt) et du nombre de véhicules au départ (f). Ce système est appliqué à chaque régie de collecte. Les résultats par régie sont ensuite regroupés afin d'obtenir le stock total de véhicules sur l'ensemble de Lyon métropole.

L'outil complémentaire ArcGIS, Network Analyst permet de déterminer le temps d'une « tournée de véhicules ». Néanmoins l'utilisation de cet outil nécessite la détermination de l'ordre des points de collecte. Afin de les obtenir, il est nécessaire de suivre une tournée en temps réel. Dans un souci de simplification (le territoire d'étude couvre 59 communes) il est choisi de se positionner sur l'hypothèse suivante. Le temps de réalisation théorique d'une collecte correspond à la somme des durées en minutes de chaque tronçon. Il est ajouté à cette durée le temps nécessaire de ramassage d'une benne à ordures. Il est estimé que le véhicule s'arrête 15 secondes afin de collecter une benne. Le nombre de bennes théorique est égal au nombre de logements présents sur la commune. Il est ajouté à cette durée le temps de parcours moyen vers l'UIOM ou le centre de tri dont dépend la régie.

La durée en minutes de l'ensemble du réseau de chaque commune est disponible grâce au réseau topologique créé précédemment.

III. RESULTATS

Cette partie présente les résultats par régie de collecte. Les résultats dépendent des hypothèses suivantes :

- L'ensemble de la collecte journalière doit être effectuée entre 6h et 13h soit un créneau de 7h.
- L'ordre de collecte s'effectue de la commune la plus proche à la plus éloignée du dépôt.
- La collecte des ordures ménagères et la collecte sélective sont effectuées par le même type de véhicules.
- Un véhicule à une capacité de ramassage de 19 T
- Le jour de référence correspond au jour qui nécessite le plus de véhicules effectifs.

a) Régie municipale Caluire et Cuire

La régie est affectée à l'UIOM et au centre de tri de Rillieux-La-Pape. Cette régie couvre 32 communes Lyon ce qui représente une durée de tournée de 468 heures. Le jour de référence nécessite 59 véhicules. La modélisation carstock détermine la **flotte optimale à 50 véhicules** afin de compléter le planning hebdomadaire de collecte. (cf. en annexe planning de tournée)

b) Régie municipale Villeurbanne

La régie est affectée à l'UIOM et au centre de tri de Rillieux-La-Pape. Cette régie couvre 4 communes de Lyon ce qui représente une durée de tournée de 145 heures. Le jour de référence nécessite 22 véhicules. La modélisation carstock détermine la **flotte optimale à 26 véhicules** afin de compléter le planning hebdomadaire de collecte. (cf. en annexe planning de tournée)

c) Régie municipale Vénissieux

La régie est affectée à l'UIOM de Gerland et au centre tri de Saint-Fons. Cette régie couvre 17 communes Lyon ce qui représente une durée de tournée de 579 heures. Le jour de référence nécessite 66 véhicules. La modélisation carstock détermine la **flotte optimale à 58 véhicules** afin de compléter le planning hebdomadaire de collecte. (cf. en annexe planning de tournée)

d) Régie Nicollin

La régie est affectée à l'UIOM de Rillieux-La-Pape et au centre de tri de Saint Fons. Cette régie couvre 3 arrondissements et 1 commune Lyon ce qui représente une durée de tournée de 266 heures. Le jour de référence nécessite 44 véhicules. La modélisation carstock détermine la **flotte optimale à 38 véhicules** afin de compléter le planning hebdomadaire de collecte. (cf. en annexe planning de tournée)

e) Régie Pizzorno

La régie est affectée à l'UIOM de Gerland et au centre de tri de Saint Fons. Cette régie couvre 3 arrondissements et 3 communes de Lyon. Cela représente une durée de tournée de 1071 heures. Le jour de référence nécessite 179 véhicules. La modélisation carstock détermine la **flotte optimale à 154 véhicules** afin de compléter le planning hebdomadaire de collecte. (cf. en annexe planning de tournée)

f) Régie Suez

La régie est affectée à l'UIOM potentielle et au centre de tri de Saint Fons Cette régie couvre 4 arrondissements de Lyon ce qui représente une durée de tournée de 445 heures. Le jour de référence nécessite 74 véhicules. La modélisation carstock détermine la **flotte optimale à 66 véhicules** afin de compléter le planning hebdomadaire de collecte. (cf. en annexe planning de tournée)

g) Comparaison des résultats

Le tableau suivant répertorie les variation de flotte par régie en entre la flotte actuellement en place sur la Lyon métropole et la flotte théorique après implantation d'une UIOM.

Tableau 6: Comparaison des résultats de la flotte de véhicule

Régie	Flotte actuelle	Flotte théorique	Variation
M. Caluire et Cuire	147	50	+13
M. Villeurbanne		26	
M. Vénissieux		58	
Nicollin	16	38	+ 22
Pizzorno	60	154	+ 94
Suez	50	66	+16
SOMME	273	392	+119

Toutes les régies enregistrent une augmentation. La régie de Pizzorno enregistre l'augmentation la plus forte avec l'ajout de 94 véhicules par rapport à sa flotte actuelle. Ces augmentations peuvent s'expliquer par le choix des hypothèses de modélisation. Notamment pour le temps de tournée par commune qui dépend de moyennes réalisées avec une tolérance élevée.

IV. CONCLUSION

L'étude de potentiel développée dans la première partie de cet article démontre que l'implantation d'une UIOM destinée exclusivement au stock de déchet non valorisé de la métropole de Lyon n'est pas justifié. Néanmoins en positionnant cette usine stratégiquement, elle peut être en capacité de collecter ce flux non valorisé ainsi que les flux extérieurs à la métropole. L'implantation de cette usine engendre donc des modifications sur les tournées de collecte des régies de Lyon Métropole.

Les résultats précédents démontrent que le parc de véhicule doit augmenter de 119 entités. Cependant, il reste difficile d'évaluer si cette augmentation est exclusivement due à l'implantation de cette nouvelle UIOM. En cause, le choix des hypothèses qui sont effectuées à une échelle macroscopique.

En effet la détermination des véritables collecte de chaque régie pour chaque commune (réseau emprunté ou non, temps d'arrêt et nombre de bennes) diminuera le nombre de véhicules nécessaire au jour de référence et donc le nombre de véhicule optimal.

D'autre part il n'est pas pris en compte les estimations de réductions de production de déchet sur l'ensemble des territoires, en accord avec la loi Grenelle 2. Les UIOM disposeront de moins de déchets et devront réduire leur capacité de traitement. On enregistre déjà un déclin pour l'incinération des déchets au niveau nationale.¹⁴ En parallèle les régions auront moins de matière à collecter.

¹⁴ Kostas Andiosopoulos, Stephan Silvestre, *French energy policy : a gradual transition. Energy Policy* : Elsevier, July 2017

ANNEXES

Carte 1: création du périmètre de protection

Carte 2 : résultat création des buffers de 500 m sur l'agglomération

Carte 3 : les zones éligibles sur le département

Carte 4 : les zones potentielles de la région

Tableau 1 : tournée de collecte de la régie municipale Caluire et cuire

Tableau 2 : tournée de collecte de la régie municipale Villeurbanne

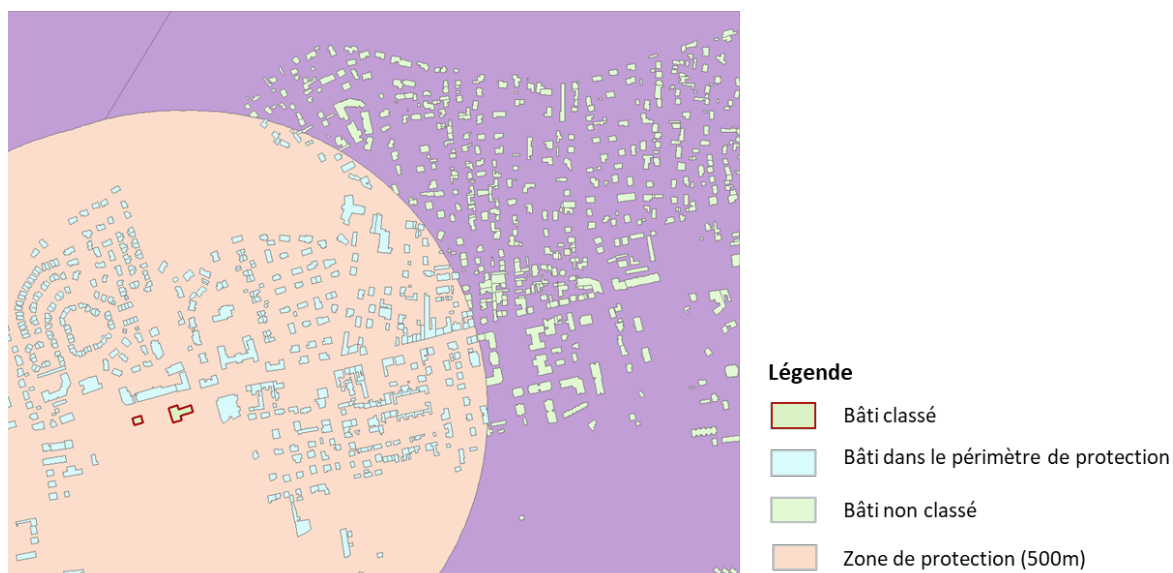
Tableau 3 : tournée de collecte de la régie municipale Vénissieux

Tableau 4 : tournée de collecte de la régie Nicollin

Tableau 5 : tournée de collecte de la régie Pizzorno

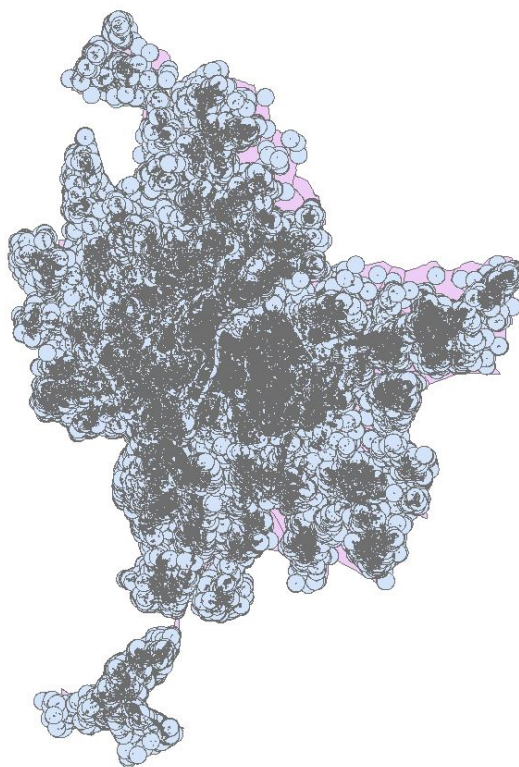
Tableau 6 : tournée de collecte de la régie Suez

Carte 1: création du périmètre de protection



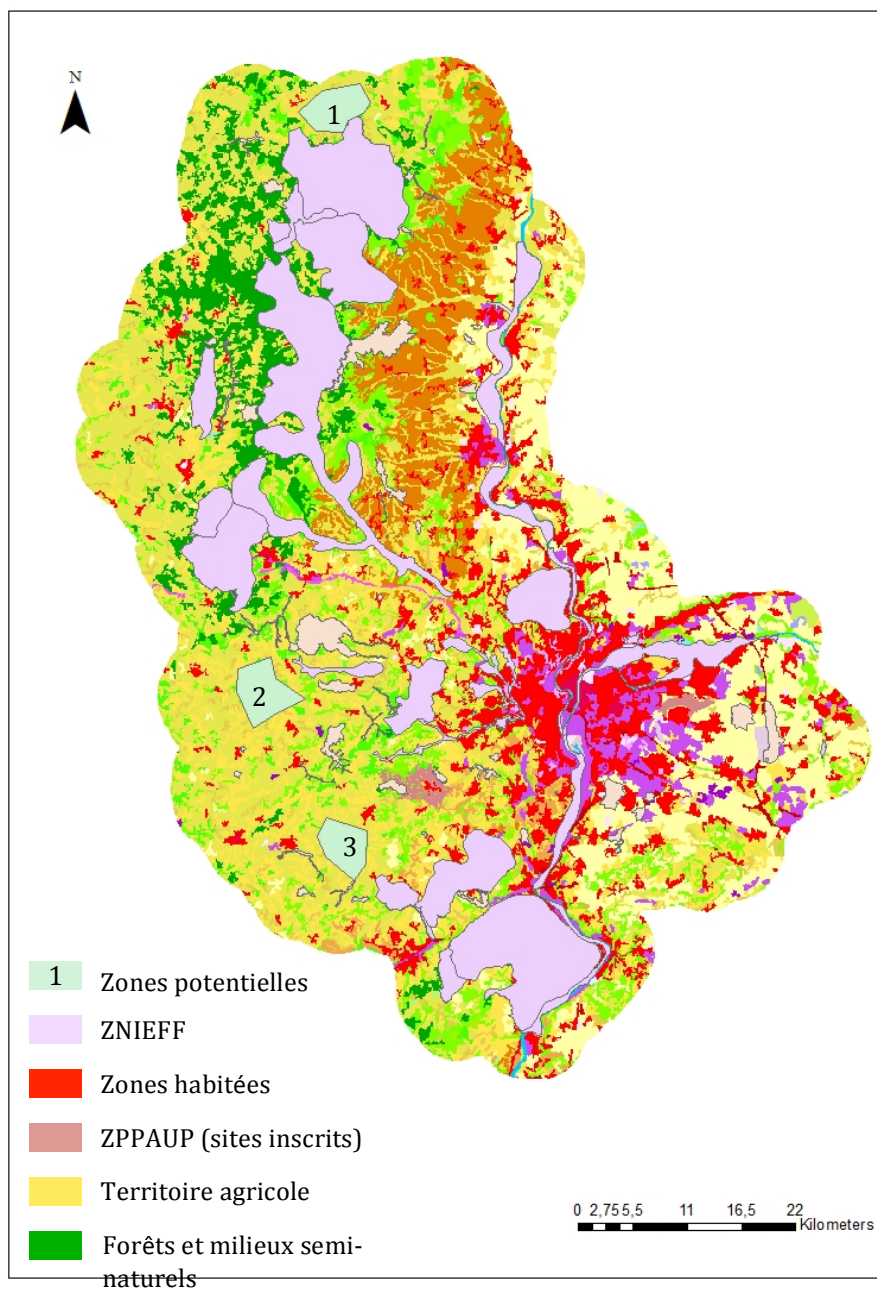
Source BTTPO/IGN

Carte 2 : Résultat création des buffers de 500 m sur l'agglomération



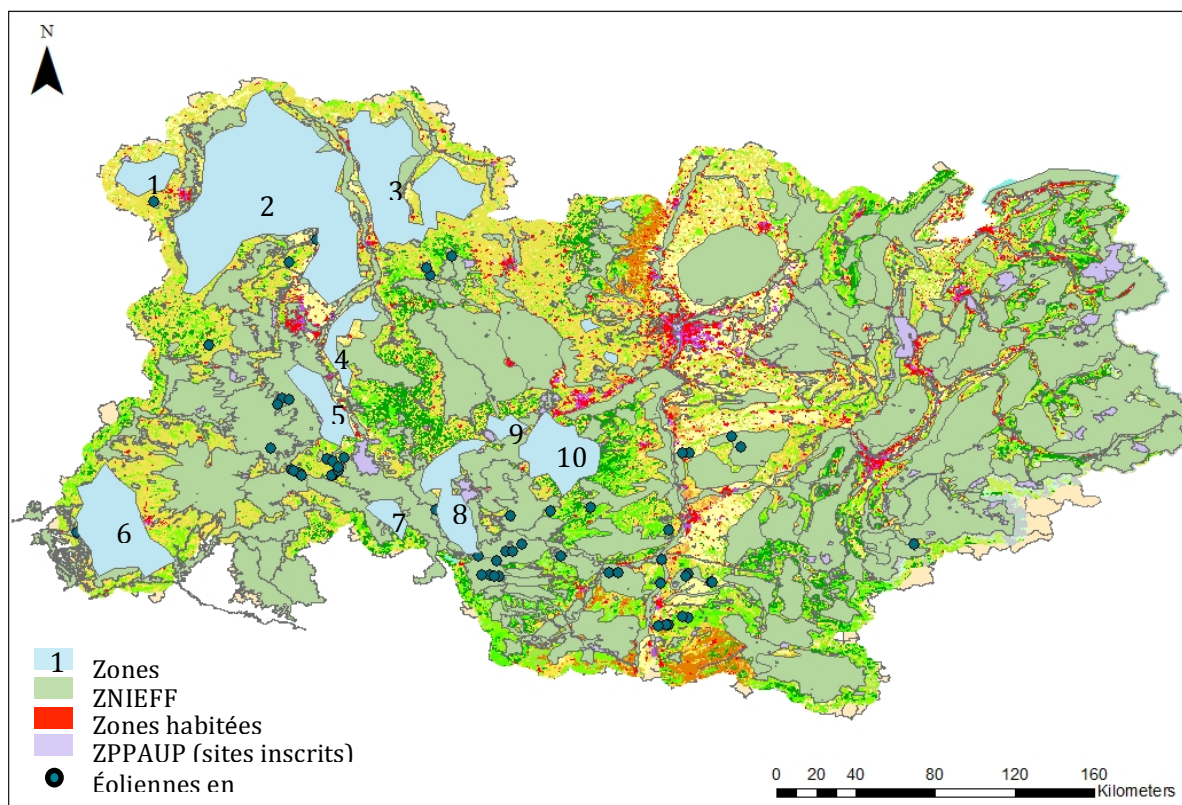
Source BTTPO/IGN

Carte 3 : les zones éligibles sur le département



Source BTTOPO/IGN-CORINE LAND COVER

Carte 4 : les zones potentielles de la région



Source BTTPOPO/IGN-CORINE LAND COVER

Tableau 1: tournée de collecte de la régie municipale Caluire et cuire

Destination	Heure de départ	Durée (H)	Flotte
Caluire et cuire	6	6	16
Charbonnières-les-Bains	12	1	10
Couzon-au-Mont-d'Or	12	1	5
Ecully	12	1	1
Ecully	6	6	6
Sathonay-Camp	12	1	6
Sathonay-Camp	6	6	1
Sathonay-Village	12	1	1
Sathonay-Village	6	4	1
Albigny-sur-Saône	10	3	1
Albigny-sur-Saône	6	2	1
Craponne	8	5	4
Craponne	6	2	1
Fontaines-sur-Saône	8	5	1
Fontaines-sur-Saône	6	1	1
Saint-Didier-au-Mont-d'Or	7	6	1
Saint-Didier-au-Mont-d'Or	6	6	1
Saint-Didier-au-Mont-d'Or	6	2	1
Rillieux-La-Pape	8	5	1
Rillieux-La-Pape	6	6	9
Francheville	12	1	9
Francheville	6	6	3
Fleurieu-sur-Saône	12	1	3
Genay	6	6	2
Limonest	12	1	2
Limonest	6	6	1
Limonest	6	1	1
La Tour-de-Salvagny	7	6	1
La Tour-de-Salvagny	6	3	1
Champagne-au-Mont-d'Or	9	4	1
Champagne-au-Mont-d'Or	6	6	1
Champagne-au-Mont-d'Or	12	1	1
Champagne-au-Mont-d'Or	6	2	1
Poleymieux-au-Mont-d'Or	8	4	1
Lissieu	12	1	1
Lissieu	6	6	1

Tableau 2 : tournée de collecte de la régie municipale Villeurbanne

Destination	Heure de départ	Durée (H)	Flotte
Meyzieu	6	6	10
Décines Charpieu	12	1	10
Décines Charpieu	6	6	7
Chassieu	12	1	7
Chassieu	6	6	2

Tableau 3 : tournée de collecte de la régie municipale Vénissieux

Destination	Heure de départ	Durée (H)	Flotte
Vénissieux	6	6	19
Irigny	12	1	17
Saint-Fons	12	1	2
Saint-Fons	6	6	5
La Mulatière	12	1	5
La Mulatière	6	6	2
Saint-Priest	12	1	2
Saint-Priest	6	6	14
Charly	12	1	9
Solaize	12	1	5
Solaize	6	3	1
Corbas	9	4	1
Corbas	6	6	3
Grigny	12	1	3
Grigny	6	6	3
Mions	12	1	3
Mions	6	6	3
Vernaison	12	1	3
Vernaison	6	5	1
Sainte-Foy-lès-Lyon	11	2	1
Sainte-Foy-lès-Lyon	6	6	7

Tableau 4 : tournée de collecte de la régie Nicollin

Destination	Heure de départ	Durée (H)	Flotte
Lyon 5	6	6	17
Lyon 9	12	1	17
Lyon 9	6	6	16
Tassin	12	1	16
Tassin	6	6	5

Tableau 5 : tournée de collecte de la régie Pizzorno

Destination	Heure de départ	Durée (H)	Flotte
Lyon 8	6	6	32
Lyon 3	12	1	32
Lyon 3	6	6	36
Lyon 6	12	1	36
Lyon 6	6	6	16
Bron	12	1	16
Bron	6	6	11
Villeurbanne	12	1	11
Villeurbanne	6	6	55
Vaulx en velin	12	1	55
Vaulx en velin	6	6	5

Tableau 6 : tournée de collecte de la régie suez

Destination	Heure de départ	Durée (H)	Flotte
Lyon 7	6	6	34
Lyon 2	12	1	34
Lyon 2	6	6	8
Lyon 1	12	1	8
Lyon 1	6	6	11
Lyon 4	12	1	11
Lyon 4	6	6	12

Bibliographie

Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie. ITOM : les installations de traitement des ordures ménagères en France. Octobre 2012. [28 mars 2018]. Disponible sur http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/85925_itom-fascicule-2010.pdf

Dan Assouline, Nahid Mohajeri, Jean-Louis Scartezzini - Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: A machine learning approach. January 2017, Pages 278-296 [28 mars 2018]. Disponible sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16305850#b0380>

Dabbaghiyan. [Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions May 2017, Pages 311-324] [28 mars 2018]. Disponible sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117300448>

Étude de législation comparée n° 247 - septembre 2014 - Les lois relatives à la protection des monuments historiques. [28 mars 2018]. Disponible sur http://www.senat.fr/lc/lc247/lc247_mono.html

Grand Lyon communauté urbaine. Plan d'actions stratégique de la gestion des déchets. 2007-2017. Novembre 2017 [28 mars 2018]. Disponible sur https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/proprete/20080408_g_l_planactionsgestiondechets_2007-2017.pdf

Grand Lyon la métropole. Rapport annuel 2016 : sur le prix et la qualité du service public de prévention et gestion des déchets ménagers et assimilés. Décembre 2017. [28 mars 2018]. Disponible sur https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/proprete/rapports/20171221_gl_proprete-rapportannuel_2016.pdf

H.Wittmann, P.Bajons, M.Doneus, H.Friesinger. Identification of roof areas suited for solar energy conversion systems May 1997, Pages 25-36 . [28 mars 2018]. Disponible sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148196001164>

Kostas Andiosopoulos, Stephan Silvestre. French energy policy : a gradual transition. Energy Policy : Elsevier. July 2017. [28 mars 2018]. Disponible sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517302380>

Margaux Bouilloux. La collecte des ordures ménagères à Lyon : construction historique et contemporaine d'un service urbain singulier. Septembre 2010. [28 mars 2018]. Disponible sur http://doc.sciencespo-lyon.fr/Ressources/Documents/Etudiants/Memoires/Cyberdocs/MFE2010/bouilloux_m/pdf/bouilloux_m.pdf

Marie Lynn Miranda, Brack Hale. Waste not, want not : the private and social costs of waste-to-energy production. Energy Policy : Elsevier, May 1997. [28 mars 2018].

Disponible sur

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421597000505>

Sindra. Observatoire des déchets en Auvergne Rhône-Alpes. Traitement des déchets ménagers et assimilés en Auvergne-Rhône-Alpes : enquête 2017, données 2016.

Décembre 2017 [28 mars 2018]. Disponible sur <http://www.sindra.org/wp-content/uploads/2017/12/SINDRA-observatoire-dechets-traitement-Auvergne-Rhone-Alpes-2016.pdf>

Table des illustrations

Figures

Figure 1: Logigramme de la courbe de charge.....	3
Figure 2: Logigramme de la courbe de charge de la production éolienne.....	4
Figure 3: Logigramme de la courbe de charge de la production éolienne.....	6
Figure 4: Méthode de sélection des bâtis	7
Figure 5: Scénario 1 : 100% éolien (Agglomération).....	9
Figure 6: Scénario 2 : 100% solaire (Agglomération)	10
Figure 7: Scénario 1 : 100% éolien (Région)	12
Figure 8: Scénario 2 : 100% solaire (Région).....	12
Figure 9: Logigramme carstock.....	17

Tableaux

Tableau 1: Surfaces éligibles	8
Tableau 2: Production selon le type d'éolienne	8
Tableau 3: Surface de toiture éligible à l'installation de panneaux photovoltaïques (Agglomération)	8
Tableau 4: Surface des zones potentielles	10
Tableau 5: Surface de toiture éligible à l'installation de panneaux photovoltaïques (Région)	11
Tableau 6: Comparaison des résultats de la flotte de véhicule.....	20

Cartes

Carte 1: Zone d'implantation de l'UIOM potentielle	14
Carte 2: Répartition des communes par régions	16
Carte 3: Affectation des communes aux UIOM.....	17
Carte 4: Affectation des communes aux centres de tri.....	17