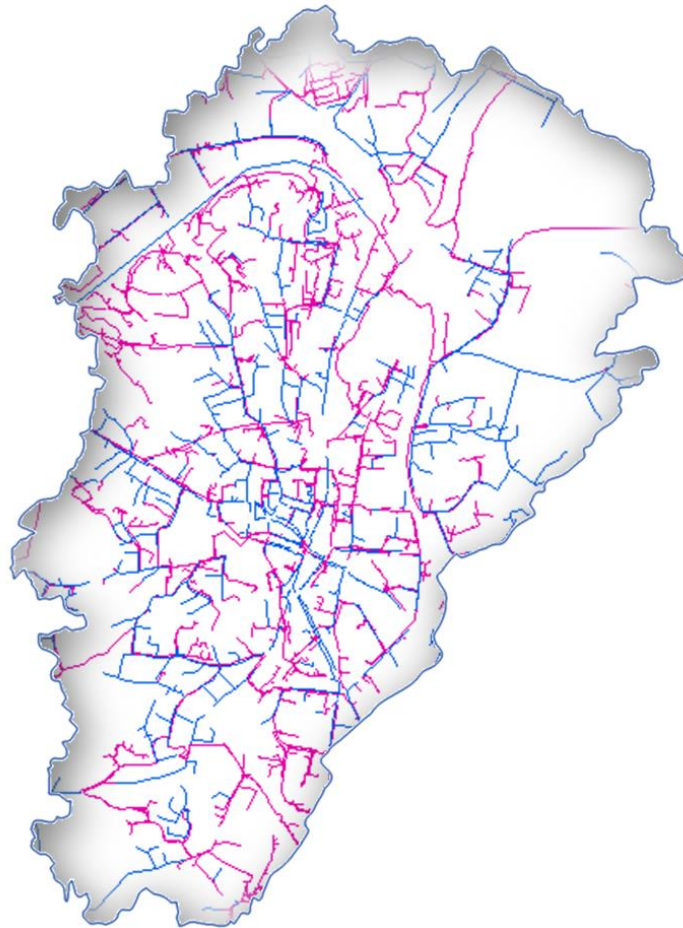


2015-2016 - Master 1 ISA

Projet SIG - Gestion des espaces urbains et périurbains

---

# Analyse fractale des réseaux de distribution d'électricité



POIRSON Allan

LEHMANN Xavier

## Remerciements

Daniel Renard, interlocuteur privilégié Jura, DR AFC ERDF, nous a apporté une aide déterminante en nous procurant via le Service Cartographie de la Délégation Patrimoine, la géométrie du réseau Jura et Haute-Saône dont ERDF est concessionnaire. Sans son concours, notre travail n'eut été le même.

Mme Houot, M Frankhauser et M Tourneux, nous ont fait part de leurs suggestions et de leur enthousiasme face à notre travail.

M Lunardi a fait preuve d'une ouverture d'esprit et de mots d'encouragement sans pareil, vis à vis de la thématique de notre sujet.

Que tous trouvent ici l'expression de notre gratitude.

## Note aux lecteurs

ERDF est tenu de garder confidentielles les informations commercialement sensibles (ICS) relatives aux utilisateurs raccordés au réseau public de distribution qu'il gère (article 20 de la loi de développement et de modernisation du service public de l'électricité du 10 février 2000). Les informations commercialement sensibles sont des informations dont la révélation pourrait porter atteinte aux règles de concurrence libre et loyale et de non-discrimination. La géométrie du réseau électrique en tant que caractéristique de la production, de la fourniture ou de la consommation est par précaution à considérer comme une ICS.

A ce titre les données du réseau brutes telles que fournit par ERDF pour ce projet, ne sont en l'état pas diffusable à des tiers.

## Introduction

« Au commencement, Dieu créa les cieux et la terre. La terre était informe et vide: il y avait des ténèbres à la surface de l'abîme, et l'esprit de Dieu se mouvait au-dessus des eaux. Dieu dit: Que la lumière soit! Et la lumière fut. »<sup>1</sup>.

Des millions de kilomètres de câble, des millions de point de connexion, du matériel de sécurité, de surveillance et d'alerte plus tard, le réseau électrique de distribution est devenu le réseau le plus complexe jamais créé par l'homme. Tout cela dans plusieurs niveaux de tension, sur chaque continent, en France : dans tout le pays, dans chaque région, chaque collectivité, dans chaque rue habitée, devant notre porte.

Depuis les débuts des réseaux de distribution d'électricité au 19<sup>ème</sup> siècle, le matériel n'a cessé d'évoluer, leur protection et leur fiabilité d'augmenter et leur exploitation se rationaliser. Tout cela non sans raisons, le réseau électrique est devenu un des réseaux si ce n'est le réseau le plus stratégique pour notre société actuelle. Tant par la captivité du marché qu'il induit mais aussi par toutes les activités secondaires qu'il suppose. Une coupure généralisée de longue durée mettrait des vies en danger et impliquerait des conséquences que l'on ne saurait maîtriser sans mal.

L'introduction d'abord marginale mais de plus en plus forte et massive d'électricité à partir de production décentralisé sur le réseau, par la volonté des pouvoirs publics de promouvoir les énergies renouvelables ou alternatives remet en cause le schéma actuel de fonctionnement du réseau. Celui-ci, parti d'un schéma très centralisé doit aujourd'hui muter et s'adapter.

L'ouverture du marché de l'énergie, voulu par l'Union Européenne, a aussi modifié le schéma initial des acteurs, issus pour la France de la loi de nationalisation des industries électriques et gazières de 1946, rajoutant au phénomène de décentralisation un phénomène de cloisonnement.

L'évolution qui s'annonce pour les réseaux avec un taux de pénétration très fort des productions décentralisés et un besoin constant de sécurisation de l'approvisionnement face aux pannes hasardeuses et aux menaces d'attaques ciblées oblige à repenser le réseau, à imaginer et concevoir son fonctionnement futur et par là même sa structure. Du fait de ses propriétés topologiques multi-échelles, la géométrie fractale est une des pistes à explorer dans le but de l'optimiser, en proposant un réseau théorique qui serait la cible. Mais qu'est ce que la géométrie fractale par son approche unique pourrait nous dire de plus sur ce que l'on connaît déjà, qu'elles sont les éléments saillants que nous pourrions mettre en exergue grâce à elle en vue tout d'abord de la compréhension améliorée du réseau et sur la cible d'architecture à atteindre ensuite.

---

<sup>1</sup> La création 1.1-1.3, La Genèse, Ancien Testament, Moïse.  
Analyse fractale du réseau de distribution d'électricité

# Le marché de l'Électricité

## LE TRANSPORT

### RTE

À l'échelle nationale, il est assuré en 400000 volts, à l'échelle régionale, en 225000, 90000 et 63000 volts.

## LA FOURNITURE D'ÉLECTRICITÉ

### Activités en concurrence

Ouverte totalement à la concurrence depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2007.



## LA PRODUCTION

### Activités en concurrence

Différentes sources d'énergie (nucléaire, thermique, énergies renouvelables tels l'hydraulique, l'éolien ou le solaire).

## LA DISTRIBUTION

### ERDF

L'électricité est distribuée via deux échelles de tension : la haute tension A <sup>(1)</sup> et la basse tension <sup>(2)</sup>. ERDF en assure l'exploitation, le développement et l'entretien.

(1) HTA : haute tension A (20000 volts).

(2) BT : basse tension (400 volts/230 volts).

**Figure 1.1 : Répartition et Segmentation du marché de l'électricité**

Le réseau de distribution d'électricité est seulement un élément au cœur d'un système électrique global issu de l'avènement du système tel que nous le connaissons jusqu'alors. Ce système global se fractionne comme suit :

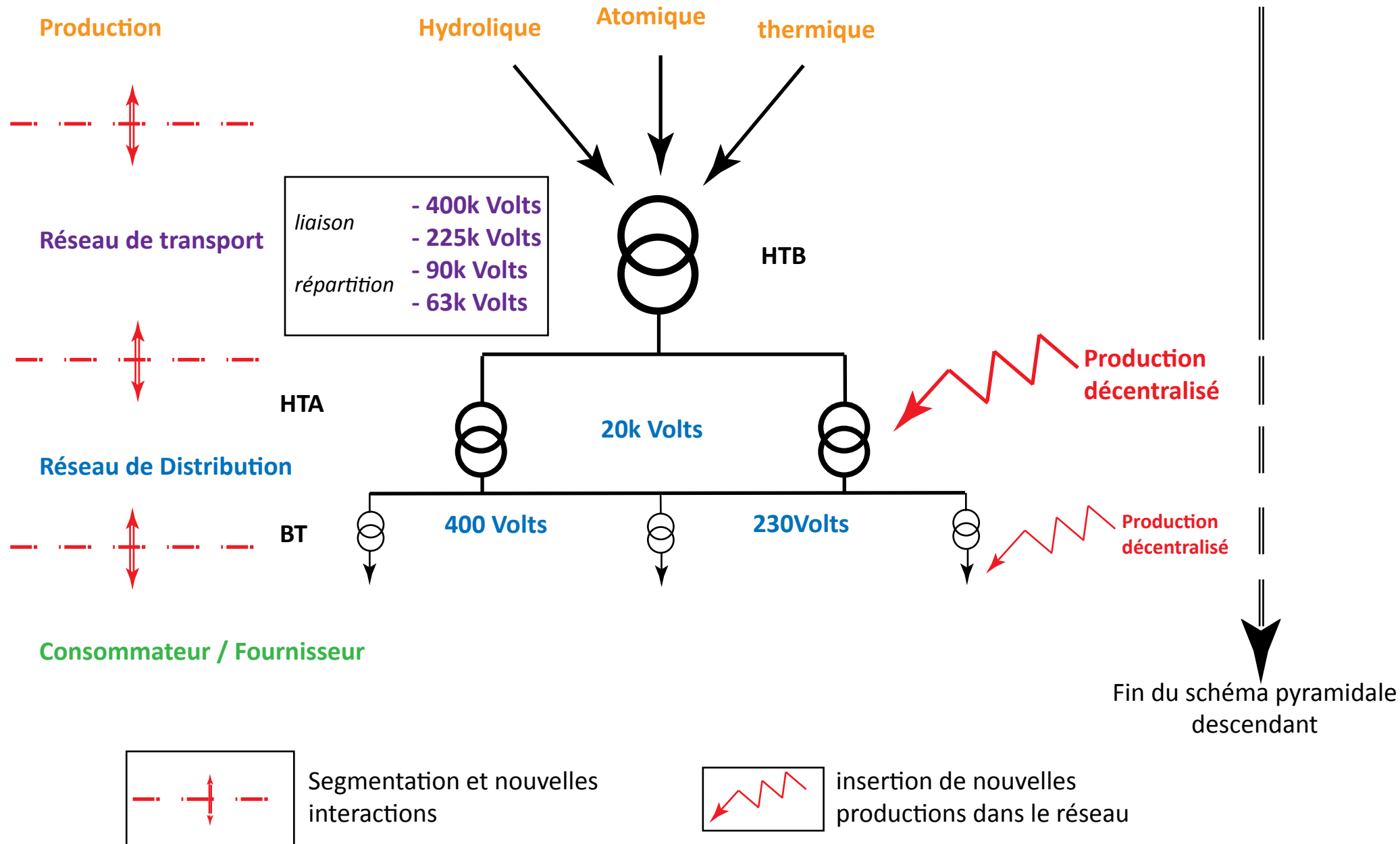
Une production fondée sur de grandes unités de production (nucléaire, hydraulique, thermique à flamme) installées à des endroits propices pour le réseau.

Un acheminement de cette électricité produite vers les grands centres de consommation, par le réseau de transport HTB (Haute tension classe B, usuellement la Haute Tension, 400K, 225K, 90 K et 63K volts) géré en monopole par RTE.

Le réseau de distribution est l'interface entre Le réseau de transport qui le fournit à partir des postes sources, et le consommateur final que lui-même fournit en HTA (Haute tension classe A, usuellement et par opposition à la HTB, la moyenne tension, 20K volts) ou BT (Basse tension, 400 ou 230 volts), géré à 95% en monopole par ERDF et à 5% par diverses entreprises locales d'énergie.

Le consommateur final qui ne fait que consommer sans participer de façon active à la gestion du reste du réseau. L'énergie fonctionne donc toujours dans le même sens, de la production vers les consommateurs via les transformateurs. Un schéma unidirectionnel du réseau simple et uniforme dans la conception. (cf. schéma ci-joint)

# Schéma de synthèse de l'Énergie



## Le réseau de distribution d'électricité

Selon la CRE (commission de régulation de l'énergie) qui en France est la haute autorité administrative indépendante chargée de veiller au bon fonctionnement des marchés de l'électricité, « Les réseaux publics d'électricité sont les infrastructures qui permettent d'acheminer l'énergie depuis les installations de production jusqu'aux installations de consommation. »

Le rôle du réseau de distribution d'électricité est de fournir en électricité à tous les clients sans discrimination en HTA et en BT. La distribution doit se faire sans discontinuité, l'onde électrique doit être de qualité et la livraison doit s'effectuer dans les meilleures conditions de sécurité et de coût.

Le réseau de distribution compte aujourd'hui le long de ses 1 332 942 km de longueur de réseau (HTA et BT) environ 35 millions de clients. Quasiment l'entière majorité des consommateurs, à quelque exception près, les très gros consommateurs qui eux peuvent être alimentés directement par le réseau de transport. Et en 2014, on a dénombré environ 404 000 nouveaux clients. Chacun des clients a subi en moyenne 64 min de temps de coupure.

On ne dénombre pas moins de 325234 sites de production décentralisés dont 321852 sont raccordés directement en BT, les 3382 restant le sont en HTA. Le ratio est donc de 98% des installations raccordées en BT. Il y a eu aussi 26800 nouvelles installations d'énergies renouvelables ou alternatives raccordées en 2014, chiffre constant ces dernières années. La pression sur la sécurité d'approvisionnement, a aussi incité à mettre en place des mesures incitatives pour les productions décentralisées et locales. Chez le consommateur lui-même.

L'impact de ses nouveaux sites est considérable et son taux de pénétration dans le réseau BT ne permet pas à notre vigilance de faillir.

Pour faire face aux nouveaux clients, aux nouveaux raccordements, aux nouveaux enjeux, il a été investi sur le réseau 3,208 Milliards d'euros en 2014. L'aspect économique revêt un élément éminemment important de ses transformations. D'autant que le phénomène de conservation environnemental et paysager rend plus difficile l'interconnexion azimut de différents réseaux du au mauvais ressenti de nouvelle ligne aérienne par les usagers. Ainsi ce n'est pas moins de 68.7% des 23050 km de nouveau réseau créé qui ont dû être mis en souterrain ou torsadés<sup>2</sup>.

Sans une vision et une stratégie nouvelle, on ne saurait alors assurer le meilleur coût de distribution possible.

Le nouveau schéma combiné à la grande diversité des sources de production complexifie les problèmes liés au maintien de la stabilité de la tension. Or, la qualité du produit fourni, c'est-à-dire la qualité de la tension est un critère fondamental de la qualité de service rendu au titre de la distribution d'électricité par le gestionnaire. Elle est régie par

---

<sup>2</sup> ERDF chiffres Clés 2014.

la norme NF EN 50160 (indice de classement : C02-160) datant de la loi du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité. Elle caractérise de la tension qui doit être fournie par les réseaux publics de distribution.

Phénomènes	Engagement standards des gestionnaires de réseau		
	CART proposé par le gestionnaire de réseau de transport RTE	CARD soutirage HTA proposé par le gestionnaire de réseau de distribution ERDF	Engagements d'ERDF pour les utilisateurs BT
Coups pour travaux	5 jours par période de 3 ans	2 coupures de 4 heures par an	10 heures par coupure
Coups	En fonction de l'historique, jusqu'à 1 coupure longue et 5 coupures brèves par an	En fonction de la zone, jusqu'à 6 coupures longues et 30 coupures brèves par an	
Niveau de tension Tension haute et Tension basse Moyenne de la valeur efficace sur 10 minutes	<p><b>40-90 kV</b> Plage de <math>\pm 8\%</math> de la Tension d'Alimentation Déclarée, précisée dans le contrat</p> <p><b>150 kV</b> Plage de <math>\pm 10\%</math> de la Tension d'Alimentation Déclarée, précisée dans le contrat</p> <p><b>225 kV</b> Plage 200 kV - 245 kV</p> <p><b>400 kV</b> Plage 380 kV - 420 kV</p>	Plage de $\pm 5\%$ de la Tension Contractuelle, précisée dans le contrat	Plage de $\pm 10\%$ de la Tension Nominale (230 V ou 400 V)

Figure 1.2 : Caractéristiques non-exhaustives régies par la norme NF EN 50160

Ce plan de tension est aussi normé afin de limiter les pertes par effet joule et par la même une perte sèche en exploitation dont le coût devrait être supporté par les consommateurs.

Au de là l'aspect financier cela sert surtout à assurer de la qualité du réseau. En cas de surtension des transformateurs en HTA pourraient saturer et leur durée de vie serait réduite. Une obsolescence avancée de ces transformateurs, en dehors du plan de maintenance établi conduirait à des coupures inopinées. La panne de 2003 qui a touché 50 millions de consommateurs en Amérique du Nord, est un bon exemple de report de charge et de surcharge en cascade qui a finit par mettre tout le système hors d'état de fonctionnement. La surtension en BT amoindrirait aussi la durée de vie des appareils des utilisateurs. En cas de sous-tension, le bon fonctionnement des appareils qu'ils soient domestiques ou industriels ne pourrait alors plus être garanti.

L'accès non-discriminatoire au réseau de distribution d'électricité, comme aux autres réseaux de distribution constitue un élément aussi essentiel du nouveau cadre du marché de l'énergie. Il y avait avant un fournisseur unique dont les tarifs étaient fixés selon la règle de calcul définie par la loi. Aujourd'hui même si le tarif dit « régulé » subsiste, d'autres acteurs du marché ont désormais le droit de proposer leur production au tarif dérégulé du marché. Toute discrimination soit par des différences de prestation de prix ou de délai au client final selon son fournisseur ralentirait le développement de la concurrence entre les fournisseurs d'électricité par la perte de confiance du consommateur final dans le système d'ouverture du marché et cela en théorie au détriment de lui-même en finalité.

La non-discrimination d'accès au réseau. Implique aussi qu'on ne peut refuser une nouvelle installation décentralisé de production, même si cela déstabilise localement le réseau. Il faut l'adapter, quelque soit le coût.

Ces acteur bien que entité indépendante doivent cependant mettre en commun leurs actions du fait des lois physique qui régissent le réseau et imposent l'équilibre entre la production et la consommation.

La libéralisation du marché de l'énergie et la multiplicité des acteurs qui en est né, le découpage de la responsabilité et la nécessité de coopération nouvelle entre les acteurs vient changer ce système qui a perduré durant plus de 100 ans sans pareille évolution.



## Smart Grid

L'effet combiné de la libéralisation du marché et de la multiplication des acteurs et l'impact des productions décentralisées complexifie de façon croissante le réseau. Cela conduit à devoir mettre en place toujours plus d'intelligence.

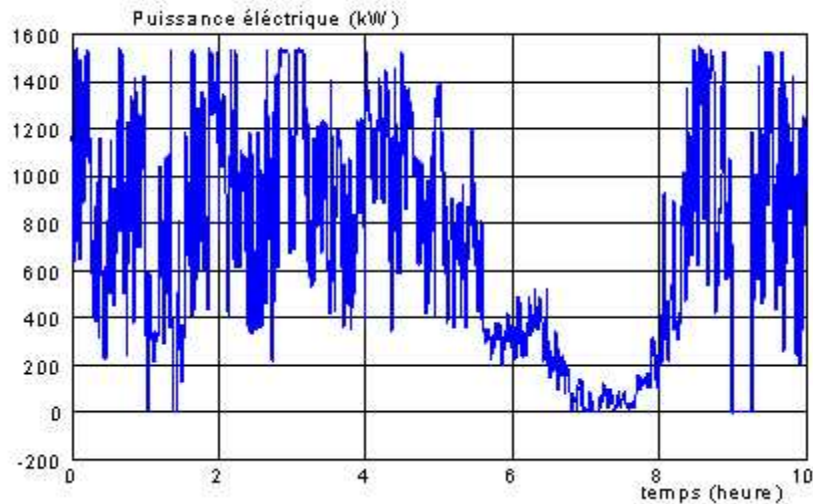
Les enjeux liés à ses nouveaux réseau dit intelligents est double. Industriel d'abord, avec le besoin constant de sécurité d'approvisionnement d'un coté et le vieillissement des infrastructures à toutes les niveaux. Sociétal ensuite, avec les préoccupations environnementales et économiques enfin avec la libéralisation du marché, l'intégration de nouveaux acteurs et la nécessité d'optimiser les investissements.

Selon la CRE un réseau intelligent est « piloté de manière plus flexible pour gérer les contraintes telles que l'intermittence des énergies renouvelables et le développement de nouveaux usages tels que le véhicule électrique. Ces contraintes auront également pour effet de faire évoluer le système actuel, où l'équilibre en temps réel est assuré en adaptant la production à la consommation, vers un système où l'ajustement se fera davantage par la demande, faisant ainsi du consommateur un véritable acteur. »

Selon la plateforme technologique européenne c'est un « réseau d'électricité qui intègre intelligemment les actions des producteurs et des consommateurs qui y sont connectés, afin d'offrir un approvisionnement en électricité efficace, durable et économique en toute sécurité ».

La définition d'un réseau intelligent peut varier d'un acteur à l'autre, mais globalement le concept se résume en la combinaison d'intelligence électronique de moyen de communication issu des nouvelles technologie de l'information au réseau électrique, afin de créer une synergie entre production, consommation et stockage dans un but de sécurité et d'efficacité.

Les énergies renouvelables ont une production plus ou moins aléatoire, tout du moins pas aussi constante que les grosses infrastructures en place. Il est difficile de garantir la puissance qu'elles peuvent fournir avec grande précision même dans le cas de prédictions les plus sophistiquées. C'est un véritable problème au regard du besoin de stabilité du réseau pour éviter les sous-tensions et les surtensions. La faculté de pouvoir être informé de l'état et de pouvoir redistribuer l'électricité ainsi produite, un des éléments clés des futurs réseaux.



**Figure 1.3 :** Puissance électrique générée par une éolienne de 1,5 MW sur 10h

L'objectif ambitieux de réduire de 20 % les émissions de CO<sub>2</sub> des pays de l'Union par rapport à 1990, prolongé par l'adoption en France des lois issues du Grenelle de l'environnement : des mesures visant notamment à maîtriser la demande en énergie, doivent modifier en profondeur l'utilisation de l'énergie et la gestion du système électrique et accentue la pression sur les attendus des réseaux intelligents.

D'autant que de nouveaux usages, comme le véhicule électrique, une clé de la mobilité décarbonnée de demain et la pompe à chaleur se développent et augmente la consommation d'électricité déjà en forte hausse et variable.

La consommation d'électricité connaît de fortes variations saisonnières et horaires. La consommation d'énergie est plus importante en hiver qu'en été. Elle fait l'objet de pointes et de creux journaliers ce qui insécurise le système et nécessite de puissants adaptateurs.

Les compteurs intelligents, élément à part entière des futurs réseaux intelligents, vont transformer le consommateur qui passera à son insu ou non, de passif à actif en permettant au réseau de moduler la charge suivant l'heure et la saison et de résoudre des contraintes ponctuelles du réseau comme des surtensions ou des pannes afin d'accroître sa stabilité.

Caractéristiques des réseaux électriques actuels	Caractéristiques des réseaux électriques intelligents
Analogique	Numérique
Unidirectionnel	Bidirectionnel
Production centralisée	Production décentralisée
Communicant sur une partie des réseaux	Communicant sur l'ensemble des réseaux
Gestion de l'équilibre du système électrique par l'offre/production	Gestion de l'équilibre du système électrique par la demande/consommation
Consommateur	Consom'acteur

**Figure 1.4 :** Caractéristiques des réseaux électriques

La mobilité électrique même si elle augmente la consommation d'électricité, pourra tout de même être une des clés du stockage d'énergie, qui justement permettra de faire tampon face aux variations de tension et aux manques ponctuels d'électricité.

Tous ces bouleversements aussi importants que l'avènement de l'électricité elle-même tant au niveau des déclencheurs que des objectifs à atteindre, vont conduire à toujours plus d'intelligence technologique, d'information et de communication. Un concept aussi ambitieux nécessite un programme de recherche aussi ambitieux sur le court moyen et long terme afin de développer, démontrer et d'obtenir un retour d'expérience afin d'identifier la cible de réseau avant le déploiement.

Mais tout cela ne saurait être optimal sans une nouvelle créativité dans la façon de penser la structure du réseau. C'est sur cette facette que l'introduction de la géométrie fractale paraît être opportun, afin dans un premier temps d'analyser le réseau existant, ensuite d'identifier une structure de réseau cible.

## La Géométrie Fractale

Comme nous l'avons vu précédemment, les réseaux électriques, et ceux de distribution en particulier, font face à un changement de paradigme qui impacte la conception que nous en avons en tant qu'objet d'étude.

Dans ce contexte, le réseau électrique traditionnel a donc été remplacé par le « Smart Grid », le réseau électrique intelligent qui couple étroitement l'infrastructure électrique et TIC dans un même système global. En effet, afin d'optimiser toute la chaîne énergétique, de la production à la consommation d'électricité, le réseau électrique doit mettre en œuvre des nouvelles fonctions d'analyse, de contrôle et de protection. Ceci doit permettre au réseau électrique de devenir plus flexible, plus accessible, plus fiable et économique.

Mais cela rend en même temps plus difficile la modélisation et l'analyse du réseau. On est en effet passé d'un réseau compliqué à modéliser du fait de sa grande taille à un réseau complexe qui pose de nouveaux problèmes aux ingénieurs et aux chercheurs qui s'y intéressent. Non seulement, la taille des réseaux va toujours croissante mais aussi les interactions en son sein sont de plus en plus nombreuses et surtout, il est de plus en plus difficile de prévoir le fonctionnement du réseau, par exemple les conséquences d'une panne ou tout simplement comment vont évoluer ses caractéristiques si son architecture ou son mode d'exploitation sont modifiés<sup>1</sup>.

En conséquence, les modèles habituels ne permettent plus d'analyser simplement les propriétés d'un réseau. Et les démarches d'optimisation deviennent de plus en plus lourdes, le concepteur de réseau n'ayant à priori que peu d'informations sur la manière de mener la recherche du point optimal et de l'efficacité.

Face à la complexité des réseaux électriques intelligents, l'étude de sa structure topologique semble être une voie intéressante. Cette structure a des conséquences déterminantes pour les pertes, les chutes de tension, la stabilité dynamique, la résistance aux pannes et aux fautes intentionnelles, etc. Dans les approches classiques de modélisation, les apports de la topologie dans l'étude du réseau ne sont pas explicites.

De par son hétérogénéité, sa décomposition possible en sous-systèmes et en composants élémentaires, son absence d'échelle caractéristique du fait de l'empilement de couches inter-agissantes entre elles, l'étude des réseaux de distribution électrique par le biais d'une approche géométrique traditionnelle est limitée. Mais il existe une démarche qui va prendre en compte dès le départ la complexité du réseau pour en identifier les caractéristiques topologiques : l'approche fractale à travers la notion d'invariance d'échelle. En effet, par leur complexité, les réseaux de distribution présentent des caractéristiques géométriques et électriques qui, à grande échelle, se reproduisent sous forme de

---

<sup>1</sup> LE Thi-Tinh-Minh, Modélisation dynamique des réseaux d'énergie électrique tenant compte des propriétés d'invariance d'échelle, 2014, G2LAB.

motifs qui sans être exactement semblables offrent de grandes similarités. Ainsi leurs ramifications peuvent rappeler la structure d'un objet fractal.

Nous allons essayer à travers cette étude de mettre en évidence un caractère fractal des réseaux électriques et pour cela, il semble dans un premier temps opportun d'évoquer les caractéristiques fondamentales des objets fractals et les moyens pour les caractériser et notamment déterminer leur dimension fractale ou dimension de Hausdorff. Après une présentation de la géométrie fractale et de ses propriétés originales complétant la géométrie traditionnelle, nous évoquerons plus précisément en quoi les réseaux, électriques notamment, se prêtent pleinement à une analyse fractale de leur formes topologiques. Enfin, nous verrons quels peuvent être les apports de cette approche pour le suivi et le développement des futur « smart grids ».

## Introduction à la géométrie fractale

Contrairement à la géométrie euclidienne, la géométrie fractale génère par définition des structures spatiales complexes, multi-échelle, hiérarchisées, d'où son intérêt dans le contexte donné des « smart grids » vu précédemment.

Les objets fractals furent introduits dans les années 1970 par le mathématicien B. Mandelbrot pour faciliter la compréhension et l'étude des formes complexes, sans ordre structurel apparent. De nombreux travaux ont montré que la fractalité était présente dans de nombreux domaines physiques, à commencer par la nature elle-même : dans une feuille de fougère, un paysage montagneux ou côtier<sup>2</sup>. D'après B. Mandelbrot, un objet fractal est ainsi une figure géométrique ou un objet naturel pouvant présenter une structure fort complexe, qui combine certaines caractéristiques : chaque partie à la forme ou structure de l'entier mais à une échelle différente et pouvant être légèrement déformée. On parle alors d'autosimilarité mais nous y reviendront. De même, sa forme est soit très irrégulière, soit très fragmentée, donc non différentiable.

Le domaine d'application des fractales, d'abord purement mathématique, s'est vite étendu à de très nombreuses matières des sciences théoriques et expérimentales : Informatique, médecine, biologie, physique, astrophysique et mécanique. Aussi s'est-elle étendue aux sciences humaines et sociales, et notamment dans l'étude des villes et dans les analyses spatiales urbaines (par exemple, Batty et Kim, 1992; Batty et Longley, 1994; Batty et Xie, 1996; Frankhauser, 1994; Frankhauser et al, 2008; Lam et De Cola, 2002; Qin et Liu, 2004; Shen, 2002; Tannier et Pumain, 2005; ou Batty, 2008 pour une synthèse)<sup>3</sup>. Un très grand nombre d'articles scientifiques ont été écrits sur les aspects géographiques de la forme urbaine; Les villes sont complexes par définition et l'analyse de leur complexité

---

<sup>2</sup> ENACHEANU Octavian, Modélisation fractale des réseaux électriques, 2008, Université Joseph Fourier-Grenoble I.

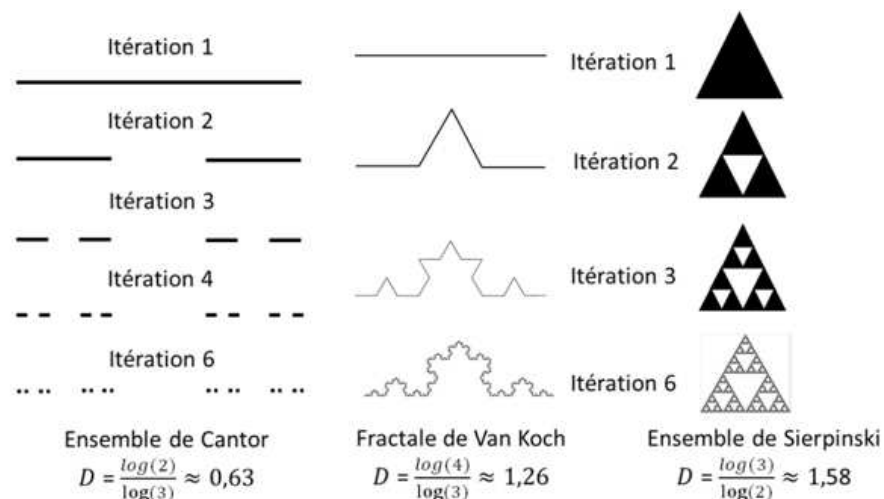
<sup>3</sup> FRANKAUSER Pierre, THOMAS Isabelle, Fractal dimensions of the built-up footprint: Buildings versus roads. Fractal evidence from Antwerp (Belgium), 2013, in Environment and Planning B: Planning and Design.

comprend, entre autres choses, la morphologie de leurs composants. «Morphologie urbaine» couvre plusieurs caractéristiques telles que la forme, la densité et l'utilisation des terres, ainsi que leurs interrelations (par exemple, Donnay et al, 2001). En plus des espaces bâtis urbains, les analyses fractales ont été utilisées pour analyser les réseaux, surtout ceux de transport.

Quelles sont les notions qui définissent la géométrie fractale ? En géométrie euclidienne « traditionnelle », la dimension d'un objet est égale au nombre de paramètres (définissant une unité de mesure) nécessaires pour le décrire. La dimension d'une droite est ainsi égale à 1, puisqu'un seul paramètre, la distance entre une origine choisie et un point de cette droite, permet de la caractériser. Une figure quelconque dans le plan a quant à elle une dimension égale à 2, puisque tout point de cette figure est décrit par 2 paramètres (une abscisse et une ordonnée). La dimension d'un objet se confond donc avec la dimension topologique de l'espace dans lequel il est plongé.

Tout comme la géométrie euclidienne, la géométrie fractale prend en compte aussi bien les points, les lignes, les surfaces que les volumes. Cependant, pour les objets fractals présentant une structure auto-similaire, leur très forte irrégularité rend inadaptée une description par la géométrie euclidienne. La dimension fractale est donc introduite pour traduire la façon avec laquelle ces objets remplissent l'espace à toutes les échelles de mesure.

Pour introduire de façon simple cette géométrie, nous allons construire l'une des formes fractales théoriques les plus connues, la courbe de Von Koch, puis nous en soulignerons les propriétés. La nature de cette fractale, comme la plupart des autres modèles théoriques, est étroitement liée au procédé de construction de cet objet. On parle de fractale construite à partir de système de fonctions itérées car elle suit une règle de construction géométrique fixe : d'une itération à une autre, on remplace chaque élément par un autre, identique pour tous (Figure 2.1)<sup>4</sup>.



**Figure 2.1 :** Exemples de structures fractales construites à partir de systèmes de fonctions itérées

<sup>4</sup> GENRE-GRANDPIERRE Cyrille, Forme et fonctionnement des réseaux de transport : approche fractale et réflexions sur l'aménagement des villes, 2000, ThéMA.

Soit un segment de longueur  $L$ , appelé initiateur de la fractale. on réduit ce segment à un tiers et on en retire le tiers central que l'on remplace par deux de ces nouveaux segments de longueur  $l_1=(1/3)L$  de façon à former un triangle équilatéral sans base, cette opération constitue le générateur de la fractale, c'est-à-dire qu'elle définit sa forme générale. La nouvelle figure contient donc au total quatre éléments de longueur  $l_1$ . La même opération se répète ensuite, chaque segment central, engendré à une étape  $i$ , étant remplacé par deux nouveaux de longueur  $l_{i+1}=(1/3)l_i$ . Ce processus forme à l'infini une ligne extrêmement irrégulière et tortueuse que l'on appelle courbe de Von Koch. Plus précisément, comme chaque élément de taille  $l_i$  est remplacé par 4 éléments de taille  $l_{i+1}$ , on peut voir que se crée au fil des itérations une hiérarchie entre la taille des éléments et leur nombre : la courbe fait au niveau global quelques grands détours, puis davantage d'agrégats à un niveau d'échelle plus fin, puis toujours plus de détours de taille décroissante. Une règle très simple génère ainsi une figure complexe dans laquelle existe une hiérarchie interne et une autosimilarité des formes quel que soit l'échelle d'observation, et qui est assimilable à un objet réel difficile à décrire avec le langage courant ou quantitativement. La construction de formes fractales théoriques a donc permis d'élaborer une règle simple pour créer des objets complexes. Cette règle va ensuite pouvoir être appliquée à des formes irrégulières réelles pour en décrire la forme.

Sur le plan mathématique, en raison de la règle stricte utilisée pour construire une fractale théorique, le principe d'emboîtement d'échelle suit une loi bien définie. Celle-ci traduit le fait qu'au cours de l'itération, un nombre  $N(\epsilon)$  croissant d'éléments est généré, dont la taille  $\epsilon$  est de plus en plus petite. Cette loi peut être écrite sous la forme (Mandelbrot, 1983; Frankhauser, 1994)<sup>5</sup> :

$$N(\epsilon) \sim \epsilon^{-D}$$

Nous venons donc de montrer que les mesures et dimension utilisées traditionnellement en géométrie euclidienne sont inappropriées pour caractériser les objets fractals ; leur mesure est en effet infinie et leur non-dérivabilité liée aux nombreuses « cassures » est problématique pour l'application des propriétés mathématiques classiques. Il est ainsi nécessaire de recourir au principe de la mesure de Hausdorff pour déterminer la dimension fractale d'un tel objet, dimension permettant de caractériser la manière qu'a l'objet pour recouvrir un espace. Il est à noter que, dans la grande majorité des cas, cette dimension fractale est non-entière contrairement à la dimension topologique. Par ailleurs, Mandelbrot précise qu'un objet fractal possède une dimension fractale strictement supérieure à sa dimension topologique. Cette dimension permet ainsi de décrire comment l'objet fractal occupe « l'espace » quel que soit l'échelle d'étude.

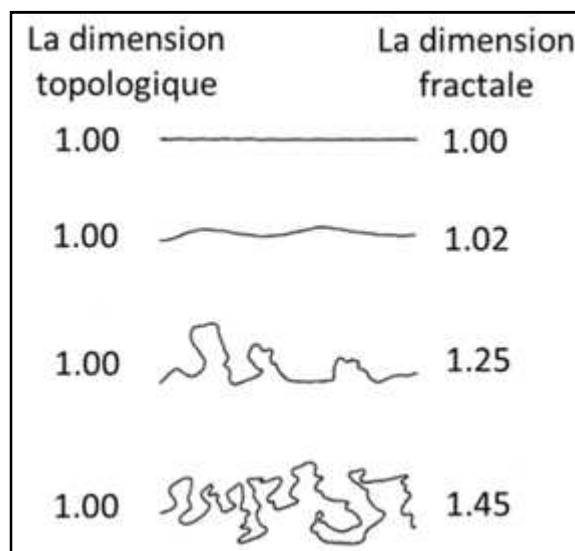
---

<sup>5</sup> FRANKHAUSER Pierre, La « ville fractale » et la fractalité des villes, 2002, in La ville émergente : Résultats de recherches

Selon cette loi, le paramètre  $D$  représente la dimension fractale ou dimension d'homothétie interne (Mandelbrot, 1983). Pour des fractales construites,  $D$  est directement lié aux nombres d'éléments  $N$  et au facteur de réduction  $r$  qui caractérisent le générateur:

$$D = -\frac{\log N}{\log r}$$

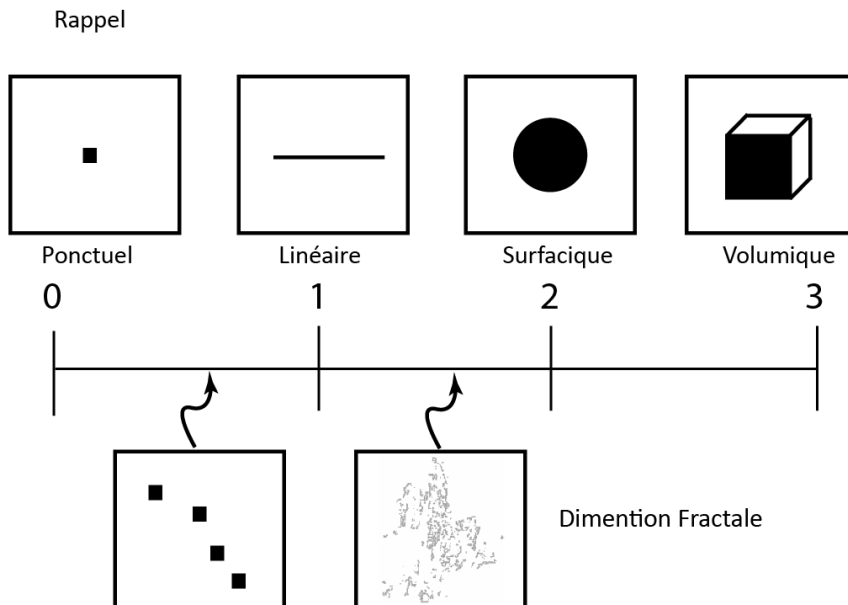
Pour la courbe de Von Koch, sa valeur de  $D$  est intermédiaire entre 1 et 2, c'est-à-dire entre la dimension topologique d'une ligne et celle d'une surface. Elle reflète le fait que la longueur de la courbe tend vers l'infini dans une surface bornée. Au-delà du cas de la courbe de Von Koch, la dimension fractale d'une ligne permet donc d'en quantifier l'irrégularité, en qualifiant la façon qu'à la courbe de couvrir la surface en multipliant les détours de toutes les tailles (Figure 2). Ainsi, plus la dimension tend vers 2, plus la courbe est tortueuse et tant à couvrir la surface ; plus elle tend vers 1, plus elle est rectiligne et tend vers le cas « limite » euclidien.



**Figure 2.2 :** Comparaison entre dimension topologique et dimension fractale (Kaye, 1994).

Ainsi, si un objet fractal vérifie la propriété d'invariance d'échelle, il se caractérise également par le fait que sa valeur de dimension  $D$  est fractionnaire et quelle est toujours supérieure à la dimension topologique de l'objet. La dimension exprime donc cette relation entre le nombre et la taille des lacunes. Sa valeur entre 1 et 2 indique que cette fractale est moins qu'une surface complète ( $D=2$ ) mais plus qu'un simple ensemble de points. La dimension fractale, ou d'homothétie interne d'une fractale, en qualifie ainsi la complexité en caractérisant le passage d'une échelle à une autre, c'est-à-dire en spécifiant la relation hiérarchique qui existe entre le nombre et la taille des éléments présents à chaque échelle. Elle ne se réfère pas à une échelle spécifique mais intègre dans sa définition l'organisation multi-échelle de la structure ; elle en caractérise la hiérarchie et le degré de complexité interne.





*Figure 2.3 : Les dimensions fractionnaires*

L'analyse fractale des structures réelles, ou empiriques, diffère quelque peu car il existe des limites dans l'autosimilarité des figures. Des limites naturelles au-delà desquelles l'objet redevient régulier, non fractal ; c'est pourquoi on préfère en général parler de comportement scalant et non de fractalité car non infini.

La description morphologique des formes complexes apparaît donc particulièrement importante en vue d'en comprendre la logique, voir le fonctionnement. Dans ce contexte, la géométrie fractale qui permet de diagnostiquer de l'ordre sous-jacent dans des morphologies complexes, que la géométrie euclidienne ne pourrait déceler, trouve des applications particulièrement importantes. On peut trouver un grand intérêt à des méthodes de mesure qui reposent sur une logique équivalente à celle des itérations afin de vérifier et de qualifier la fractalité (le comportement scalant) d'une structure empirique complexe, de connaître la taille et le nombre d'éléments caractéristiques de chaque échelle d'observation. Le réseau de distribution électrique peut être considéré comme l'une de ces structures à étudier.

## La fractalité des réseaux

Les réseaux, et plus généralement les formes urbaines, apparaissent comme des systèmes complexes, c'est-à-dire pour lesquels il n'existe pas un ordre apparent évident. L'utilisation de la géométrie fractale semble donc intéressante pour mieux caractériser ces formes et en faire émerger les éventuels ordres sous-jacents, pour aller plus loin que les seules mesures traditionnelles euclidiennes<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> GENRE-GRANDPIERRE Cyrille, *Forme et fonctionnement des réseaux de transport : approche fractale et réflexions sur l'aménagement des villes*, 2000, ThéMA.

Les réseaux électriques peuvent être modélisés sous forme de structures fractales. Les facteurs qui portent à croire que les réseaux puissent être assimilés à de telles structures est la ressemblance visuelle de forme et d'organisation, une inscription non-homogénéité dans la surface. On constate également une certaine similitude interne dans les réseaux, les formes se ressemblent quel que soit l'échelle d'observation. Il devient impossible à partir d'un détail isolé de la structure de savoir à quel niveau d'échelle il se rapporte. On a donc une représentation valable, non pour telle ou telle échelle, mais pour l'ensemble d'entre-elles. Cette propriété que possède une partie d'un objet d'être exactement semblable à l'objet lui-même à une dilatation près se nomme l'invariance d'échelle.

La topologie d'un réseau, de par ses fonctions de desserte optimale d'un territoire, est marquée par deux principes structurants qui ont dicté sa morphogénèse: d'une part l'allongement du trajet qui vise à desservir le maximum de structures comme le bâti, et d'autre part la ramification hiérarchique qui vise à minimiser la longueur totale du réseau (Frankhauser, 1994). Les deux principes induisent une desserte non homogène qui se manifeste par l'émergence d'une hiérarchie d'espaces non desservis. Cette hiérarchie interne, avec la notion d'invariance d'échelle, représentent deux principes fondamentaux qui caractérisent les formes fractales et les opposent aux formes traditionnelles. La dimension fractale repose sur ces principes et reflète cette organisation hiérarchique en indiquant le nombre de distribution des éléments présents à chaque échelle. La spécificité dimensionnelle des réseaux, de part une relation longueur-surface non conforme aux principes euclidiens, peut donc mieux se comprendre à travers l'étude fractale.

On a pu noter, avec l'étude de la ligne de Von Koch notamment, qu'une structure fractale est un objet intermédiaire entre ligne et surface, ce pourquoi on lui attribue une dimension non entière entre un et deux. Or, les réseaux relèvent de cette même logique. En effet, topologiquement, ils sont constitués de lignes et ont de ce fait une dimension un. Toutefois, au vue des principes fonctionnels d'allongement et de ramification que nous avons vus, ils s'inscrivent fortement dans la surface qu'ils ont vocation à desservir en la maillant. Aussi, se rapprochent-ils de structures à dimension deux.

Considérer les réseaux d'un point de vue fractal revient donc à les assimiler à des structures à topologie linéaire ou maillée, qui remplissent plus ou moins complètement la surface. Il faut rappeler qu'une valeur proche de deux indique que le réseau tend vers une distribution homogène, tandis qu'une valeur proche de un traduit l'existence d'une forte hiérarchie, en se focalisant sur des zones importantes.

Ainsi, nous pouvons retrouver, dans l'observation des réseaux, les principes fondamentaux caractérisant la géométrie fractale. L'intérêt de l'étude fractale sur les réseaux de distribution électrique peut donc avoir un intérêt en permettant d'étudier la façon dont le réseau est disposé dans l'espace, c'est-à-dire de pouvoir distinguer des zones en fonction de la qualité de desserte fournie par le réseau, celle-ci étant vue comme une proximité physique au réseau. Il est donc possible de distinguer des réseaux réels selon leur organisation hiérarchique et de les comparer à des structures théoriques de référence à partir des valeurs de ces mesures.

En analysant les réseaux électriques de façon inter-scalaire à travers une grille de lecture inhabituelle car basée sur un modèle de distribution non homogène et hiérarchique, l'analyse fractale vise à mettre à jour sous leur complexité apparente un éventuel ordre interne. Si un tel ordre existe, les réseaux peuvent alors être décrits et qualifiés par les indices de la géométrie fractale (les différentes dimensions). Il devient possible de classer ces objets complexes, de les catégoriser relativement à leur fractalité, c'est-à-dire en fonction de leur organisation spatiale, de la façon dont ils s'inscrivent dans la surface.

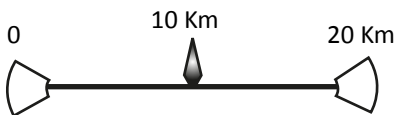
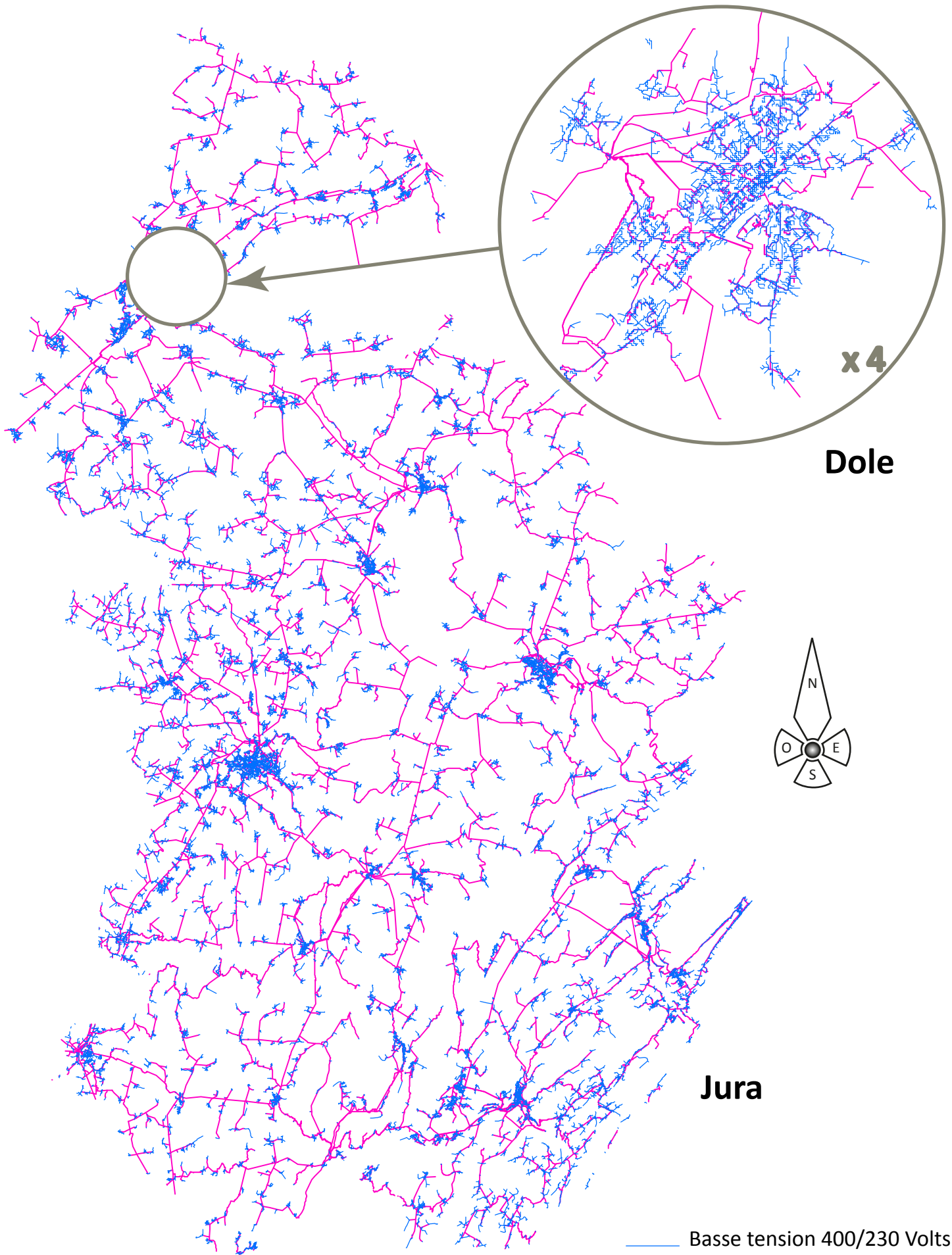
L'intérêt potentiel de telles mesures pour les réseaux de distribution électrique rejoint le changement de paradigme auquel ils devront faire face. Les réseaux électriques actuels sont, comme nous l'avons vu, destinés à connaître une profonde mutation dans les prochaines années. Avec l'émergence des nouveaux usages propres aux « smart grids », la nécessité de conserver un équilibre à tout instant entre production et consommation va indéniablement reposer sur les principes structurants du réseau pour lesquelles des capacités d'ajustement très réactives seront de mise. La topologie du réseau électrique est en effet centrale dans la gestion des demandes énergétiques en tout point du territoire. Parfois, les coupures et pannes observées sont dues à des défaillances du réseau, de par son incapacité à acheminer la production disponible au point de consommation à cause de congestions, pertes ou pannes. Dans le temps, une demande d'électricité plus importante et plus volatile est à prévoir.

Pour être capable de transporter et d'amener des quantités croissantes d'énergie électrique à des consommateurs toujours plus nombreux et décentralisés depuis des sources de production très diverses et inégales, l'intelligence infrastructurelle et spatiale des réseaux de distribution est centrale. Comprendre la complexité de l'architecture du réseau est donc capital pour gérer la construction de futures nouvelles lignes qui devront apporter une sécurité et efficacité de distribution maximale à leur secteur d'affiliation. De même, l'émergence de sous-systèmes plus ou moins en interrelation avec l'ensemble du réseau peut nécessiter une bonne connaissance de ces propriétés hiérarchiques et multi-échelle. A travers tous ces exemples d'évolution, l'optimisation du réseau repose sur une bonne connaissance topologique que seule l'analyse fractale, par les principes et fondements structurelles qu'ils partagent, est capable d'apporter au vue d'une modélisation d'ensemble.

Savoir s'il existe une relation entre la fractalité du tissu urbain d'une ville et celui du réseau électrique qui l'alimente, si ceux-ci sont corrélés ou non suivant leur comportement scalant et quels facteurs influencent cette relation (topologie, distance, densité, ruptures), sont autant de paramètres applicables pour une bonne optimisation des réseaux avec leur territoire. De même, les propriétés propres aux réseaux peuvent amener à leur catégorisation suivant la nature, de leur topologie ou de leurs critères d'optimisation suivant l'environnement dans lesquels ils évoluent (zones denses, zones diffuses, espaces urbains et ruraux).

# Invariance d'échelle du réseau de distribution d'électricité

ERDF, février 2016



## Données

Pour réaliser notre étude qu'on a décidé d'orienter sur 3 axes : analyse fractale globale et locale du réseau et comparaison des dimensions fractales d'une aire bâtie et du réseau électrique de cette même aire. On fera aussi une rapide exploration de l'analyse du volet desserte du réseau. Les données qui nous étaient nécessaires pour réaliser cette étude, sont la géométrie d'un réseau électrique, la géométrie des bâtiments et la liste de quelques zones cibles

Nous avons reçu en dotation la géométrie des réseaux électriques ERDF du département du Jura et de la Haute-Saône (cf. Carte ci-jointe). En effet, ERDF au niveau national se décompose en DR (Direction Régionale), AFC (Alsace-France-Comté) pour notre part elle-même sectorisée en 3 territoires, 67-68, 25-90 et 39-70 lequel dernier, nous a fournit les données.

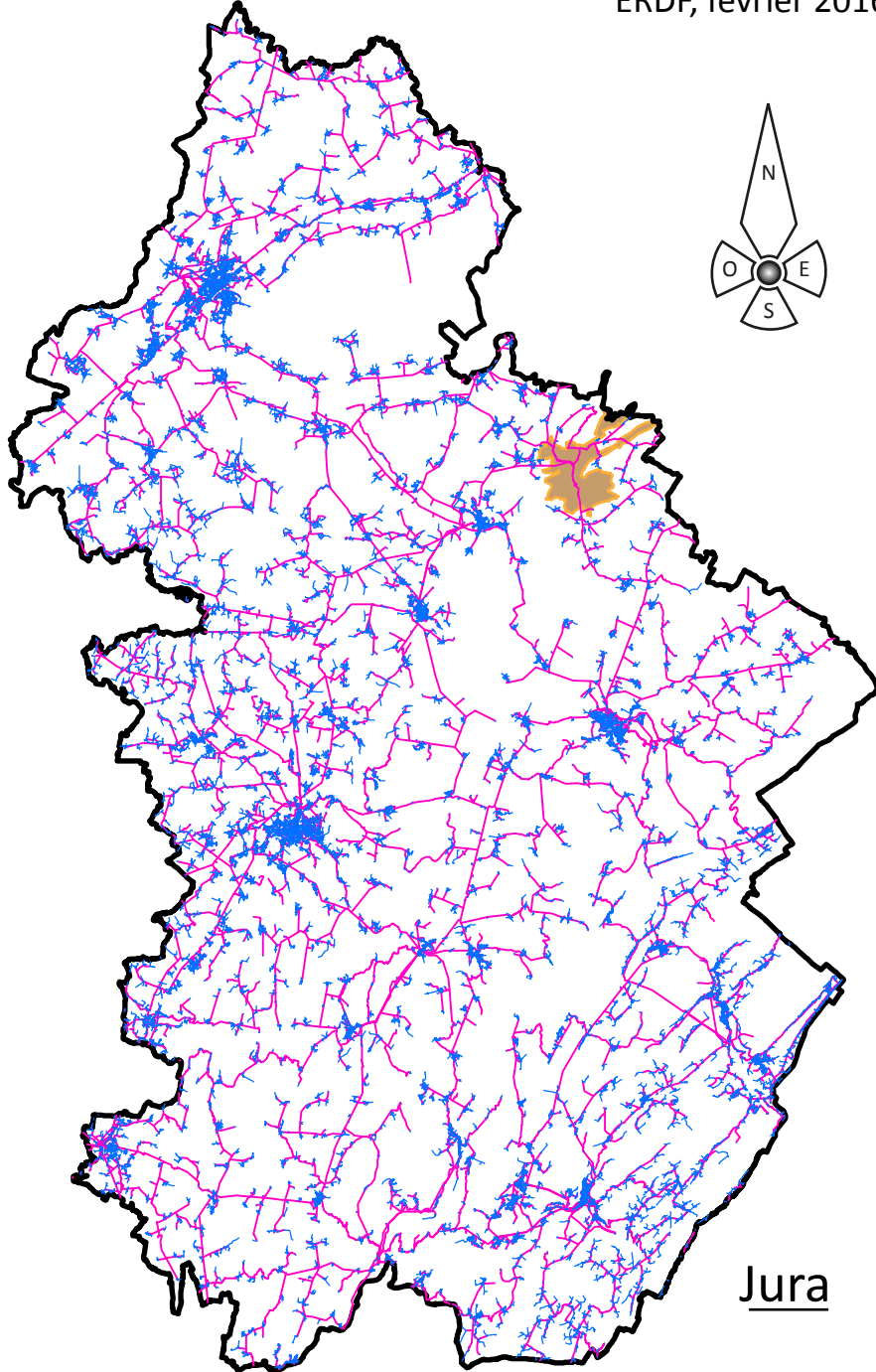
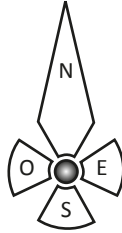
Le Jura électrique en 2015 c'est plus de 160 000 clients raccordés au réseau de distribution dont 1100 nouveaux raccordements, soit plus de 1585K MW d'énergie acheminés par an. 12 postes sources sont à l'origine des 4100 Km de réseau HTA dont 36% en souterrain et 3979 km de réseau BT dont 31% en souterrain et 4265 postes de transformation HTA/BT. Il y a eu en 2015, 7 millions d'euros investit pour renforcer et moderniser le réseau électrique. On décompte, 82 minutes de temps moyen de coupure par habitant dont 29 minutes pour travaux. Toutes les communes à l'exception de deux, Salins-les-Bains et Bracon qui sont gérées par la régie de Salins-les-Bains sont exploités par ERDF. Le service public de distribution d'électricité au travers d'un cahier des charges de concession a été confié par le SIEDEC (Syndicat mixte d'énergies, d'équipement et de Communication du Jura) autorité concédantes d'énergie électrique à ERDF, qui a elle-même reçu délégation de la part de toutes les communes du Jura.

La Haute Saône électrique en 2015 c'est plus de 120 000 clients raccordés au réseau de distribution dont 900 nouveaux raccordements, soit plus de 1231K MW d'énergie acheminés par an. Ici aussi 12 postes sources sont à l'origine des 3000 km de réseau HTA dont 38% en technique souterraine, des 3165 km de réseau BT dont 29% en souterrain et des 3230 postes de transformation HTA/BT. Il y a eu en 2015 6,3 millions d'euros investit pour moderniser et renforcer le réseau électrique. 56 minutes de temps de coupure moyenne par habitant dont 20 min pour travaux. Le service public de distribution d'électricité au travers d'un cahier des charges de concession a été confié par le SIED70 (Syndicat intercommunal d'énergie du département de la Haute-Saône) autorité concédantes d'énergie électrique à ERDF, qui a elle-même reçu délégation de la part d'une partie des communes de la Haute-Saône. En effet, une autre partie des communes font Partie du groupement SICAE Ray-Cendrecourt.

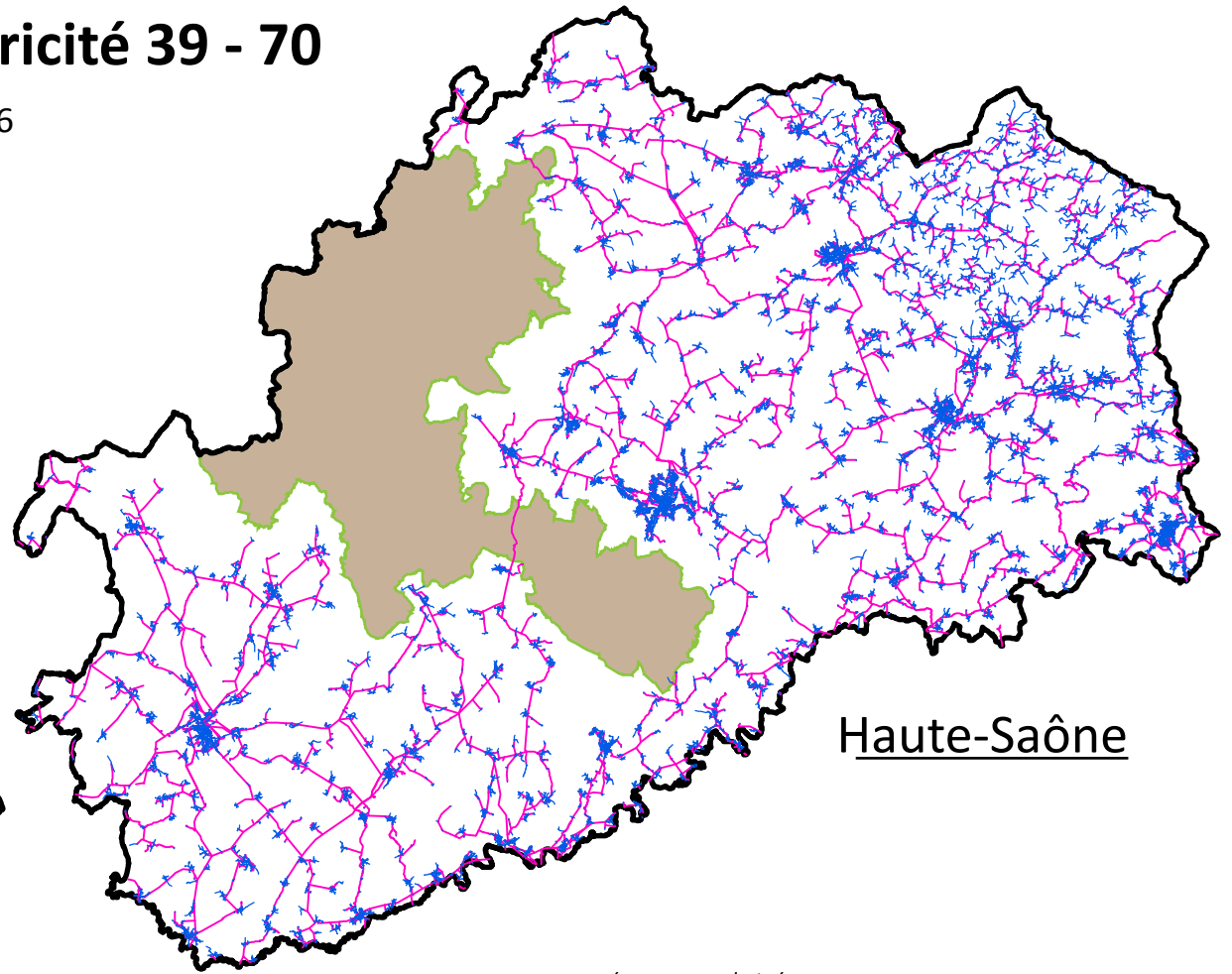
Au début du XXème siècle, l'électricité apparaît dans les villes mais les campagnes sont délaissées pour des raisons de rentabilité. Plusieurs agriculteurs de la Haute Saône, la Haute Marne et des Vosges décident de créer une SICAE (Société d'Intérêt Collectif Agricole d'Electricité) afin d'amener l'électricité dans leurs villages. En 1946, la loi nationalise toutes les entreprises d'électricité et créer EDF. Les entreprises locales de distribution comme les SICAE et les Régies de par leurs statuts sont exclues de la nationalisation. Aujourd'hui les SICAE sont toujours existantes et alimentent au niveau national plus de 1000 communes dans 10 régions, soit plus de 500 000 habitants.

# Le Réseau de Distribution d'Électricité 39 - 70

ERDF, février 2016



Jura



Haute-Saône

*Réseau exploité par ERDF*

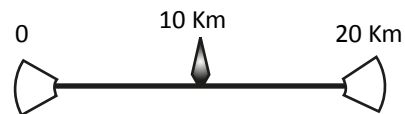
— Basse Tension (400/230 Volts)

— Moyenne Tension (20k Volts)

*Zones non-exploitées par ERDF*

■ SICEA de Ray-Cendrecourt

■ Régie de Salins-les-bains



Dans le cadre de notre problématique sur la multiplicité des producteurs il est à noter qu'en 2015 le Jura dénombre 1950 producteurs d'énergie dont 155 nouveaux et que la Haute-Saône n'est pas en reste avec aussi 1690 producteurs dont 131 nouveaux.

## Couche réseau

Pour chaque département, les données sont arrivées morcelé en 4 fichiers distincts en format shapefile. Deux fichiers pour le réseau basse tension (400 et 230 volts), un pour l'aérien et un pour le souterrain. Enfin, deux fichiers pour le réseau haute tension classe A (20k volts) un pour l'aérien et un pour le souterrain.

La dénomination des fichiers est comme suit :

Elec E Tronçon aerien BT ME Position

Elec E Tronçon aerien HTA ME Position

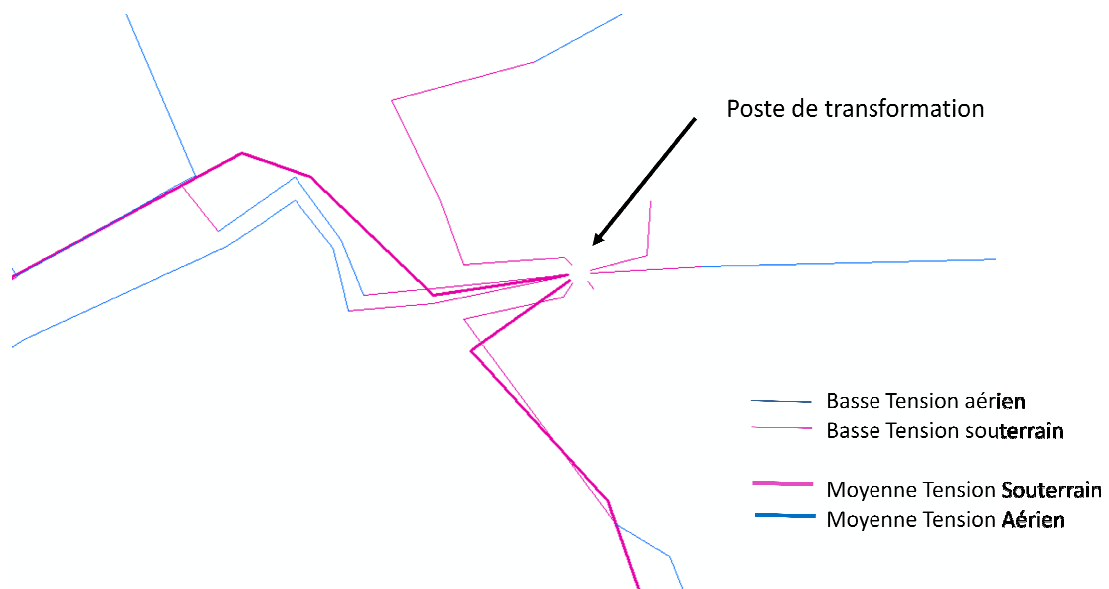
Elec E Tronçon cable HTA ME Position

Elec E Tronçon cable BT ME Position

→ Câble pour le souterrain et ME signifiant Moyenne Échelle, par opposition à la GE, grande échelle (200<sup>ème</sup> et 500<sup>ème</sup>) qu'utilise aussi ERDF.

Aucun des fichiers n'étaient géoréférencés. Il a donc fallu leur définir une projection avec l'outil éponyme de la Toolbox d'ArcGis. Le système de projection choisi est le Lambert 93 RGF93 afin d'avoir une similarité avec la projection du bâti défini par la BD topo de l'IGN.

Avec l'outil Combiner (Merge), Nous avons créé des fichiers BT et des Fichiers HTA. Il est très vite apparu que le réseau était très fractionné dans sa géométrie, hérité de la nature antérieure du réseau, aérien ou souterrain.



*Figure 3.1 : Géométrie des réseaux électriques*

Comme on le voit sur cet exemple, parti d'un poste de transformation, le réseau est d'abord souterrain puis aérien puis peut redevenir souterrain. L'information est riche, même

si pour le cadre de cette étude c'est dans un premier temps inutile. Elle alourdi de façon superflue les fichiers, et peut faire prendre du temps de calcul supplémentaire.

Nous avons donc utilisé la fonction Fusionner (Dissolve) pour épurer les fichiers, en utilisant l'option, ne pas créer de lignes fractionnées. Le résultat est une baisse de 40% du nombre de tronçon de ligne, et donc une baisse d'autant dans le poids de la table attributaire.

L'exemple montre aussi un second problème, c'est le fait que les lignes ne soient pas jointes au niveau des postes de transformation. Pour rappel il y a 4265 poste de transformation dans le Jura et 3230 en Haute-Saône. Il est donc impossible de faire une action manuelle sur ces 7495 sites, d'autant que cela représente en moyenne 6\*7495 lignes (1 ligne HTA rentrante, une sortante et 4 lignes BT sortantes).

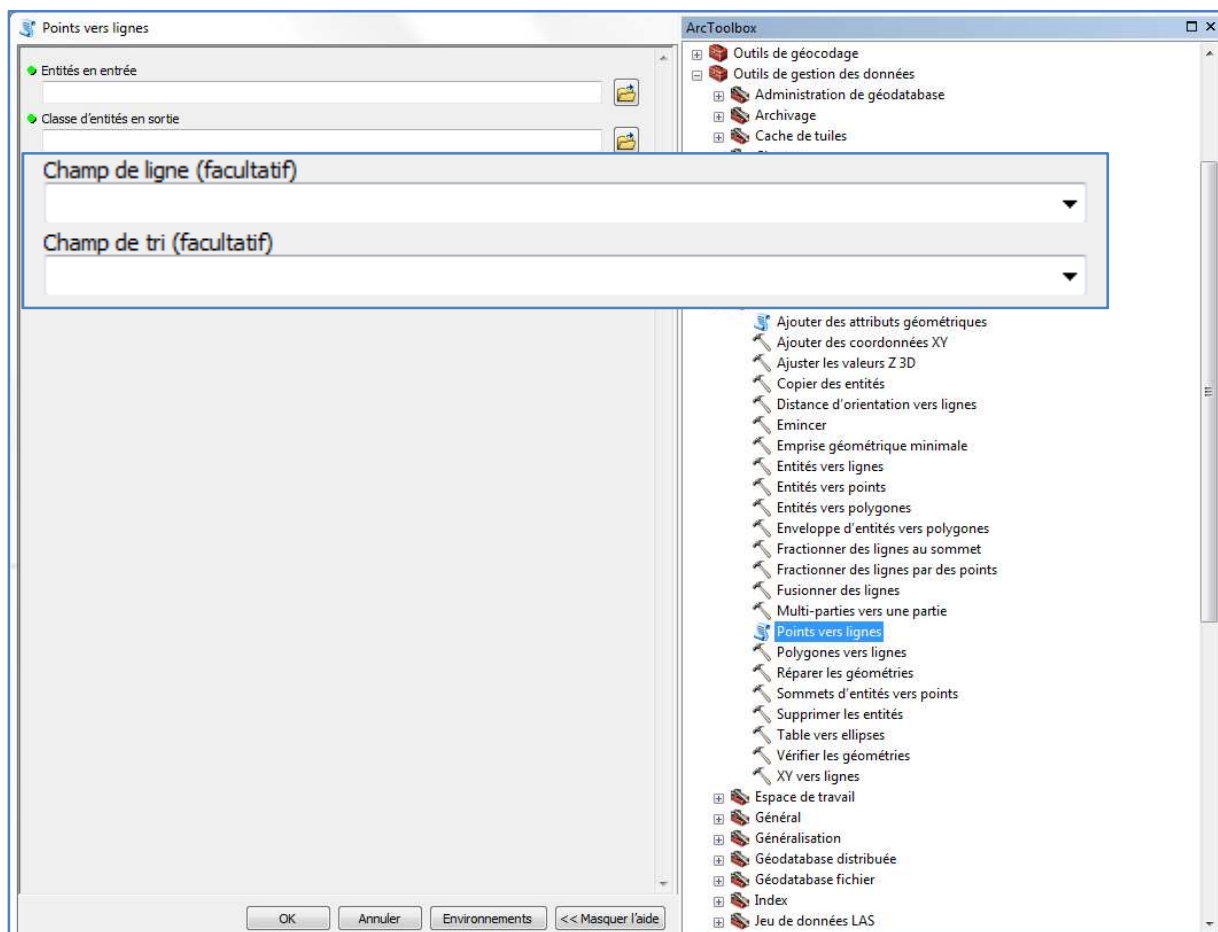
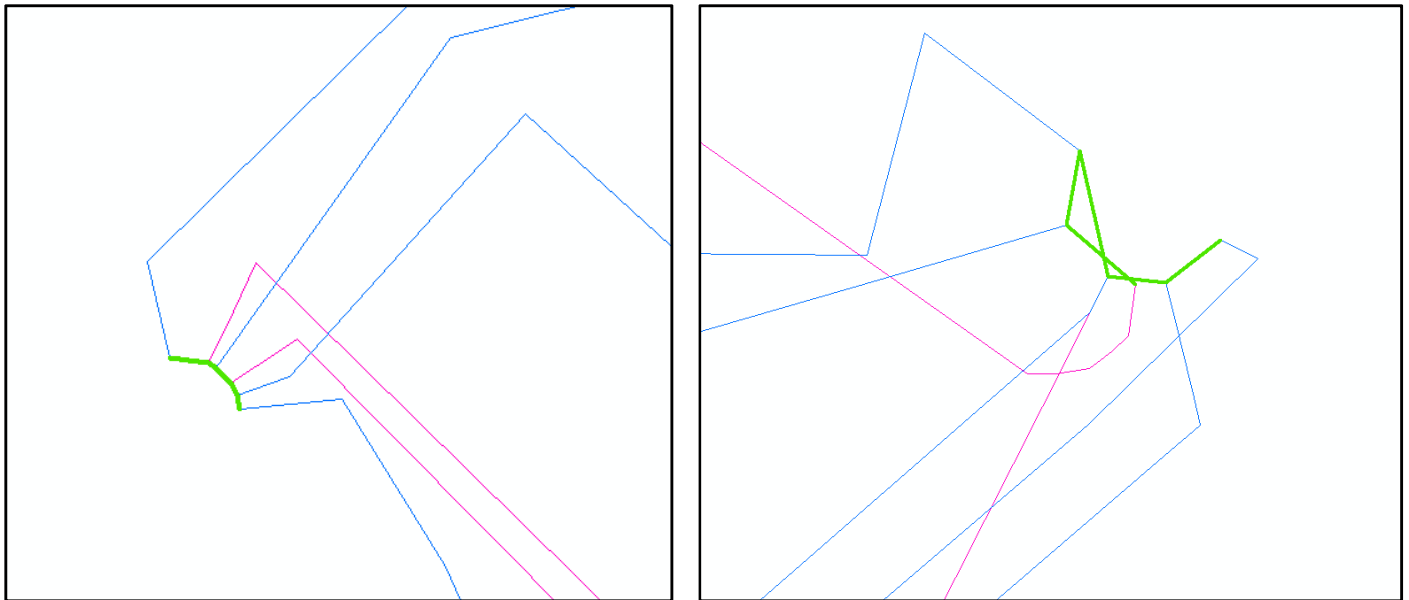


Figure 3.2 : Script Points vers lignes dans ArcGIS

Après le test de plusieurs méthodes, celle qui a abouti est d'utiliser le Script Points vers lignes, d'Entités dans les Outils de Gestion de données. Les points se relient en une ligne en fonction du « Champ de ligne ». L'essentiel de l'opération consistant à attribuer à chaque point un « identifiant de zone » correspondant à son poste de transformation. Les points d'un même poste de transformation se relient alors entre eux mais qu'entre eux. Sans ce champ de ligne tous les points se relient tous entre eux. Le champ de tri a aussi été utilisé afin que les points d'une même zone se relient aussi d'une façon déterminée non-aléatoire. Nous avons choisi en fonction de la coordonnée X du point.





*Figure 3.3 : Jointure des lignes du réseau électriques.*

Le paramètre important a été le choix de la distance caractérisant la zone, pour une distance de zone de 2m, cela permet de relier 98% du réseau. Avec 1% non relié à cause de la distance trop faible et 1% qui ne sera de toute façon jamais relié à cause de sa localisation sur la bordure. Il faut une distance de zone de 4m (ce qui ne représente rien sur le terrain, 10-15m aurait été conceptuellement plus difficile à justifier) pour relier 99% du réseau.

Sur ces deux exemples, on peut voir le résultat du géotraitement. Les tronçons sont reliés entre eux de façon plutôt propre et minimaliste avec seulement l'essentielle du tronçon manquant créé. Ce sont donc plus de 7000 tronçons de liaison qui ont été générés.

## Couche Bâti

Pour la création de la couche bâtie qui servira à l'analyse comparative entre morphologie urbaine et analyse fractale du réseau. Nous avons utilisé les couches bâties de la BD Topo. Les couches que nous avons exploitées sont : bâti indifférencié, bâti remarquable, bâti industriel et réservoir. Toutes les autres couches : cimetière, construction légère, construction surfacique, construction linéaire, construction ponctuelle, terrain de sport, piste d'aérodrome n'ont pas été utilisées pour la composition du fichier de référence car tout ces éléments augmente de manière artificielle la surface supposée bâtie et a un impact direct sur la dimension fractal de la zone. De plus on peut prendre l'exemple du cimetière ou du terrain du sport qui ne sont pas directement reliés au réseau de distribution d'électricité, tout au plus ce seront les vestiaires ou les gradins qui le seront reliés en tant que bâti indifférencié.

Un problème nous est apparu au commencement de l'analyse, c'est la sélection de la zone d'étude. Nous étions partis tout simplement pour analyser toutes les villes de plus de 2000 habitants en sélectionnant ces villes et leur réseau par leur limite administrative, en utilisant comme masque de découpe le polygone de leur surface. Mais la limite, est que la ville peut être dense mais peu étendue et de ce fait la zone à analyser est très petite. Et cela

est très brutal pour le réseau qui est découpé de manière décidée sans réelle logique terrain. Cela a pour effet d'augmenter l'effet de bordure sur le réseau.

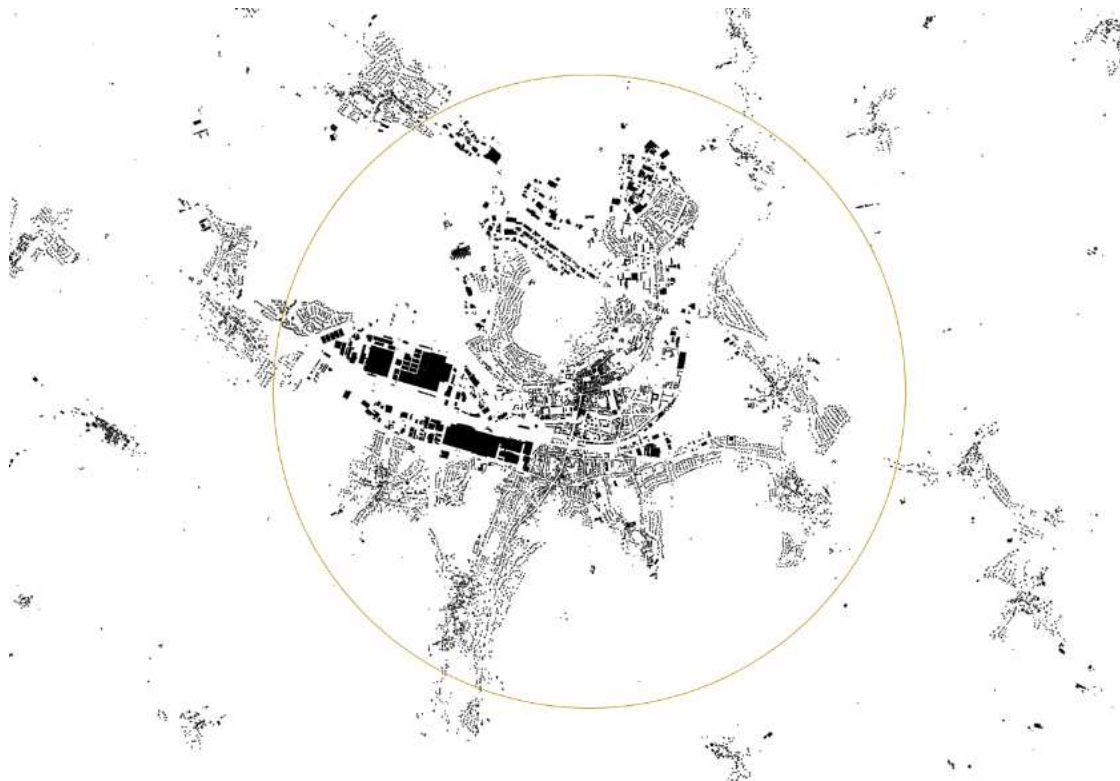
Nous avons donc opté pour une autre stratégie afin d'élargir la zone d'analyse et la sélectionnée de manière plus logique. La sélection d'aires urbaines, la ville centre avec les communes autour mais sans que cela ne se fasse là encore par découpe purement administrative.

Nous avons donc utilisé ce qui est une des caractéristique de l'analyse fractale, sa propension à faire une analyse morphologique fine et différente afin de trouver des limites morphologiques naturelles aux aires urbaines.

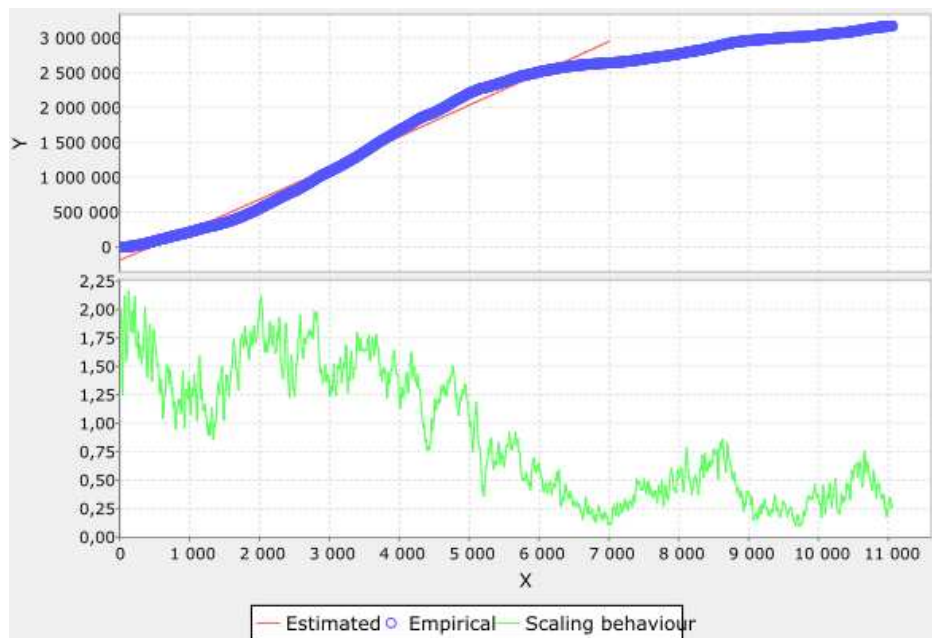
Notre choix s'est porté sur neuf des principales villes du Jura et de Haute-Saône. Elles présentent toutes une population supérieure à 5 000 habitants : Dole, Lons-le-Saunier, Saint-Claude et Champagnole pour le Jura ; Vesoul, Héricourt, Lure, Luxeuil-les-Bains et Gray pour la Haute-Saône.

La dimension radiale permet d'étudier la disposition spatiale de la structure en fonction de l'éloignement à un centre de comptage. Un point, choisi comme centre de comptage, est entouré de cercles de rayons croissants. On calcule ensuite la masse de la structure incluse dans le cercle. La courbe du comportement scalant du bâti qui en résulte est un bon indicateur pour identifier les ruptures morphologiques d'une zone urbaine.

Sur le logiciel FracGis, on exporte la couche bâtie de l'unité urbaine que l'on cherche à extraire en vectoriel et on lance une analyse radiale en prenant soin de disposer manuellement le curseur initiateur de comptage au centre de l'agglomération.



*Figure 3.4 : Exemple sur l'aire urbaine de Vesoul*



*Figure 3.5 : Courbe du comportement scalant de l'aire urbaine de Vesoul*

Après l'analyse, on obtient une feuille de calculs présentant la pente bi-logarithmique de la densité à laquelle on demande de faire apparaître la courbe du comportement scalant local afin d'observer les ruptures dimensionnelles dans la tâche bâtie nous permettant d'identifier une unité urbaine cohérente en délimitant l'agglomération morphologique de la ville.

A partir de cette analyse, on peut extraire manuellement l'unité urbaine sur ArcMap. Un clic droit sur la barre supérieure des tâches du logiciel permet d'ouvrir une fenêtre présentant une liste d'extensions. On utilise « Draw » pour ouvrir sur l'espace de travail la fenêtre nous permettant de dessiner des formes sur notre couche bâtie de l'unité urbaine à extraire.

On choisit ensuite en tenant compte de la courbe du comportement scalant pour identifier les limites de la tâche urbaine, tout en affinant la forme en prenant compte manuellement de la disposition générale du bâti. Un double clic nous permet d'obtenir un polygone à la forme de l'unité urbaine à extraire. Afin de pouvoir l'enregistrer indépendamment de toute autre couche et pouvoir la réutiliser par la suite, un clic gauche sur les fonctionnalités de « Drawing » à gauche de la barre à outils de « Draw » permet de convertir le calque en une nouvelle couche shapefile indépendante.

Cette couche forme ainsi le calque de découpe qui va nous servir à extraire l'unité urbaine de la couche du bâti mais aussi la portion de réseau de distribution électrique alimentant cette même unité urbaine.

## Aires d'analyses

Une fois que les aires urbaines ont été sélectionnées et que les polygones en tant que masque de découpe ont été créés, il fallait répéter la même manipulation 18 fois, 9 fois pour la couche bâti et 9 fois pour la couche réseau.

Nous avons donc créé un petit modelbuilder pour automatiser la tâche répétitive, comme on peut le voir ci-dessous.

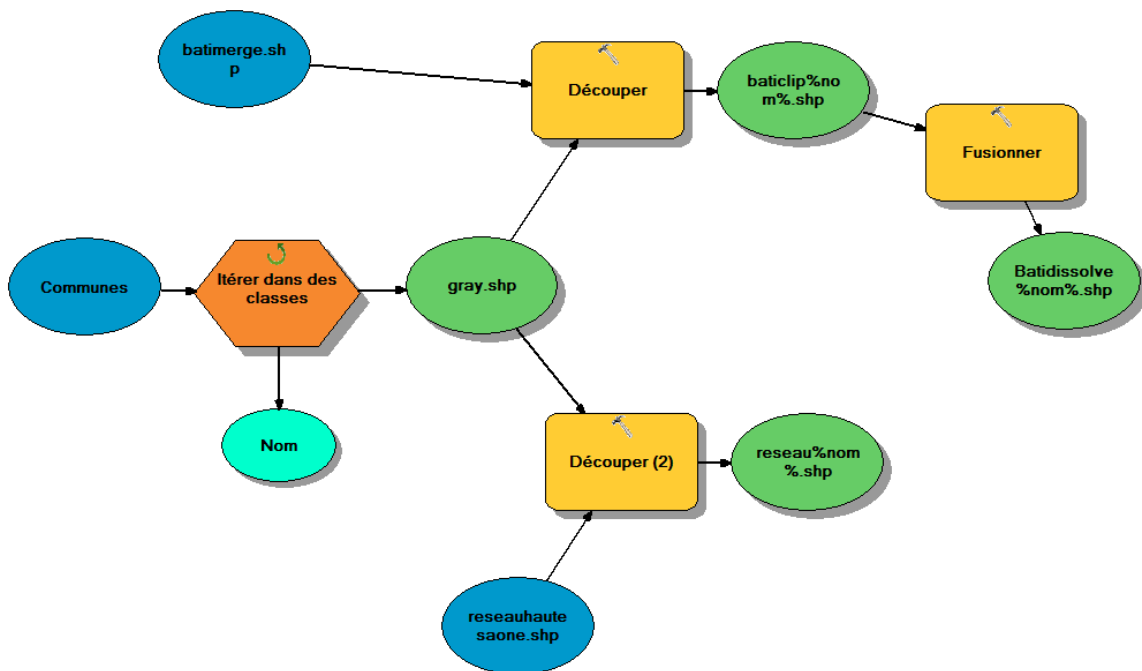


Figure 3.6 : Modelbuilder de préparation des données.

Les polygones de découpes qui sont les mêmes et pour la couche bâti et pour la couche réseau sont contenus dans un dossier Communes. Les deux fichiers à découper sont ceux que nous avons préparé en amont, le fichier réseau HTA/BT/ avec les liaisons et le fichier de la couche bâti.

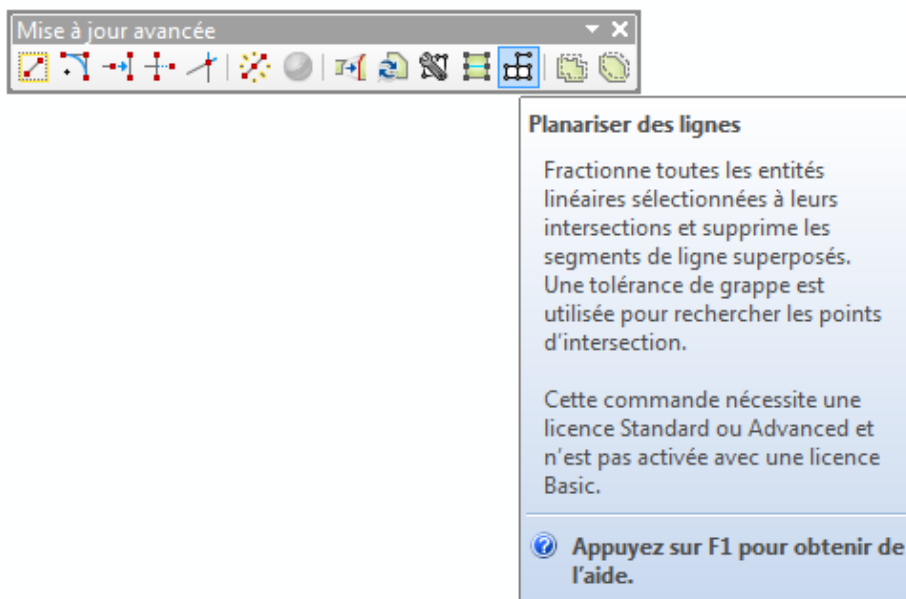
Pour que l'opération se fasse pour tout les polygones de découpe, nous avons inséré un itérateur, classe d'entité pour ce model. Le polygone découpe donc de la même manière le réseau et le bâti qui lui est aussi suivi de la fonction fusionner (dissolve) avec le paramètre ne pas créer de polygone multi-parties, plus dans le souci d'alléger le fichier. On aurait pu Fusionner la couche bâti en amont de la découpe mais le temps de calcul est long et cela n'a pas d'intérêt car on utilise qu'une petite partie très localisée de cette couche au final.

Ce modèle est à utiliser deux fois, une fois pour le Jura et une fois pour la Haute Saône en changeant les fichiers sources et les polygones de découpe, dans le cas que nous avons choisi. On aurait pu aussi enrichir le modèle pour ne le faire tourner qu'une seule fois.

En combinant les couches Jura et Haute-Saône d'abord faisant des fichiers globaux et ensuite en découpant indifféremment dans les deux départements. C'est au choix.

Les couches bâtis sont utilisables directement dans FracGIS. Ce n'est pas le cas malheureusement des couches réseaux. Pour une raison inconnue celle-ci ne veulent pas s'afficher directement dans FracGIS.

Par chance, en essayant différentes manipulations, une planarisation des lignes dans la Mise à Jour avancée de l'éditeur a permis de résoudre le problème et une fois l'opération (rapide mais manuelle) effectuée, les couches réseaux s'affichent dans FracGIS et on peut commencer l'analyse Fractale.



**Figure 3.7 :** Planarisation des lignes dans la mise à jour avancée

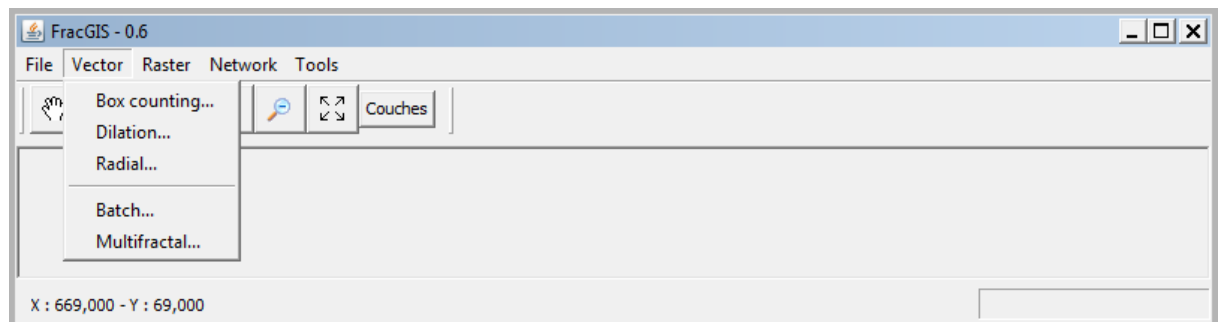


**Figure 3.8 et 3.9 :** Données obtenues après traitement, réseau et bâti ville de Dole.

## FracGIS - Logiciel d'analyse fractale

Le logiciel FracGIS est développé au sein de l'équipe "Mobilités, Ville et Transports" du laboratoire THÉMA. Il s'inscrit dans les travaux menés depuis plusieurs années par Pierre Frankhauser et plus récemment Cécile Tannier sur l'analyse morphologique par la géométrie fractale.

FracGIS a été initialement développé pour estimer la dimension fractale de la surface bâtie des villes. Il peut être utilisé pour calculer la dimension fractale d'autres entités, comme les réseaux ou les zones agro-écologiques d'une exploitation et pour notre sujet le réseau électrique de distribution. Contrairement à son prédécesseur Fractalyse, FracGIS peut travailler sur des données en format vecteur non plus seulement en raster. Disposant de données vecteurs, qui par fondement sont plus riche en principe de construction. Nous n'utiliseront dans notre étude que ce format, nous revenons sur le sujet plus bas.



*Figure 3.10 : Analyses vectorielles de FracGIS*

Les méthodes d'analyse possibles en format vecteur sont :

Méthode des boites (Box counting)

Dilatation (Dilation)

Analyse radiale (Radial)

Et dans une autre mesure,

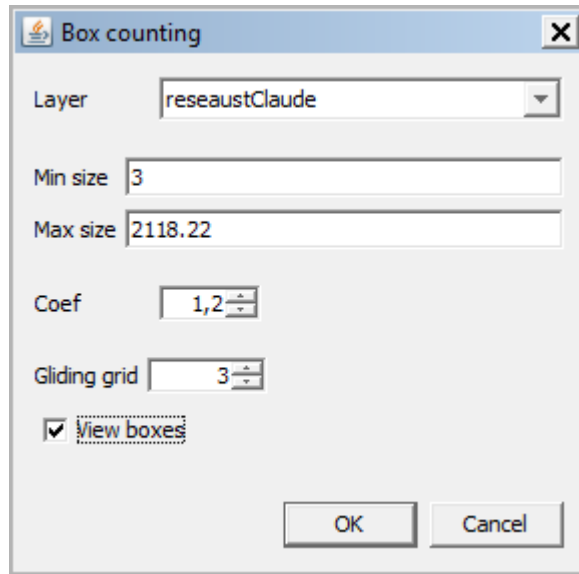
Méthode des lots (Batch)

MultiFractal.

Box counting

En géométrie fractale, la dimension de box-counting, également appelée dimension de Minkowski est une manière de conduire au calcul de la dimension fractale d'une composition en comptant à chaque échelle le nombre de boîte de dimension déterminée pour recouvrir l'ensemble de la composition. La formule de calcul est la suivante :

$$\dim_{\text{box}}(S) := \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} \quad \text{avec } \varepsilon : \text{taille de la boîte}$$



*Figure 3.11 : Paramètres de la fonction Box Counting*

Dans notre étude nous avons prioritairement utilisé cette méthode de calcul de la dimension fractale. Les différents paramètres sont :

La taille minimale et maximale des cellules. Elles sont proposées par défaut par le logiciel. Elles correspondent pour la taille minimale au plus petit ensemble qu'il détecte et pour la taille maximale à l'étendu du fichier. De manière récurrente, on pu constater qu'il propose 1 comme minimal pour le réseau et entre 3 et 3,5 pour le bâti. Pour la suite de notre étude nous avons systématiquement utilisé une taille minimale de 3, pour le réseau et le bâti.

Le coefficient qui est multiplicateur. Par défaut, il est de 2. En le modifiant avec les flèches proposées, il s'incrémente de 1 et ainsi ne propose que des nombres entiers. Partant de ce postulat, et confronté au problème d'une suite géométrique de raison 2, qui est exponentielle et donc arrive rapidement à la taille maximale requise pour le calcul. Nous avons dans un premier temps voulu palier à ce problème en affinant les résultats avec plus de valeurs.

Pour cela, nous avons modifié avec la taille minimale de départ en lui donnant des valeurs de nombre premier (1, 3, 5, 7) afin avec cette raison de 2 d'obtenir plus de résultats différents et donc de pouvoir affiner par exemple la définition de la courbe du comportant scalant. Cela résout en partie le problème, mais pas totalement, l'effet exponentiel des suites géométriques perdurant.

En réalité, il est possible d'inscrire en coefficient des nombres non entiers < 1. Pour la suite de notre étude nous avons utilisé de manière systématique le coefficient 1,2.

Enfin, le dernier paramètre est le « gliding grid », littéralement le glissement, en l'occurrence des boites. En théorie, la grille qui est positionnée de manière déterministe peut dans certain cas ne pas se positionner de façon la plus optimale dans l'absolu et donc augmenter de manière artificielle le nombre de boite nécessaire pour couvrir la surface. Pour palier ce problème, à chaque échelle on fait le calcul sur 2 ou plusieurs grilles

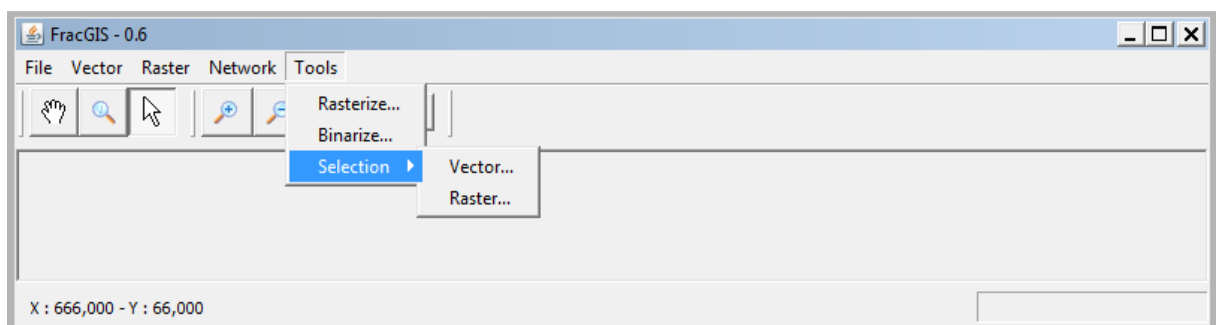
différentes, décalées chacune d'un cran ne gardant que la « meilleure », celle utilisant le moins de boîtes pour couvrir la surface.

En faisant nos tests, nous avons remarqué qu'il existe effectivement une petite différence entre le calcul sur 1 seule grille et sur plusieurs. En revanche, la différence entre 2, 3 ou 4 grille est marginale. Pour la suite de notre étude nous avons utilisé de manière systématique un gliding grid de 3 par cohérence avec la taille minimale de boîte de 3. Cela permettant d'avoir en théorie un résultat plus exact, même si le  $R^2$ , et ce de manière systématique a tendance à baisser.

Pour approfondir notre propos sur le  $R^2$ , il est à noter comme on vient de le dire qu'un gliding a tendance systématique à baisser sa valeur alors que l'idéal serai qu'il soit le plus proche ou égal à 1. Mais en plus, un  $R^2$  du réseau électrique est naturellement plus faible que celui du bâti par exemple et ce à cause, de la masse que représente le bâti, le réseau est lui très fin en représentation vectorielle et n'a donc pas cette masse.

Comme nous l'avons dit, nous avons utilisé le format vecteur pour toutes nos analyses. Cependant FracGIS, offre la possibilité de transformer un format vecteur en raster avec en paramètre le choix de la taille du pixel, c'est la fonction Rasterize que l'on voit ci-dessous.

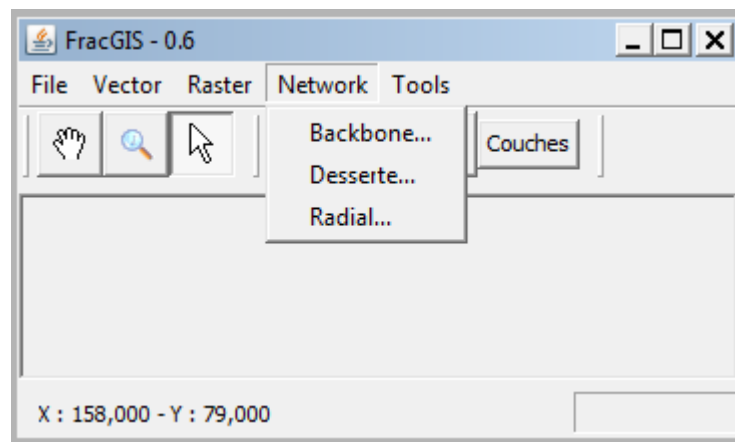
Nous avons utilisé cette fonction dans la phase exploratoire du logiciel. Afin de comparer les résultats obtenus en vecteur et en raster pour une même méthode de calcul. Les résultats sont tout à fait semblables, comme cela avait déjà été testé sur du bâti. Nous n'avons donc choisi de continuer qu'en format vecteur.



*Figure 3.12 : Les outils de FracGIS*

Dans ces outils, FracGIS offre aussi la possibilité de faire une sélection (comme on le voit ci-dessus) des fichiers vecteurs ou rasters que l'on a chargé. Cet outil s'est avéré utile pour faire nos sélections pour l'échelle locale de notre étude, nous y reviendrons.





*Figure 3.13 : Les fonctions réseau dans FracGIS*

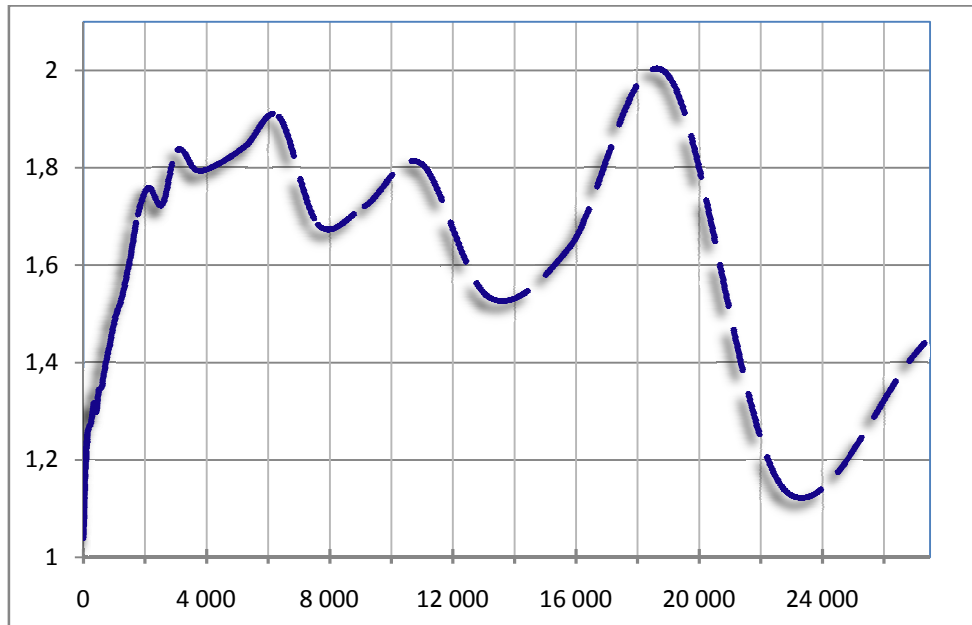
Enfin, dernière fonctionnalité que FracGIS propose est l'analyse réseau.

La fonction Backbone (colonne vertébrale), permet en indiquant un point origine et un point d'arrivé de déterminer, le chemin le plus court et tout les autres chemins possibles pour relier les deux points.

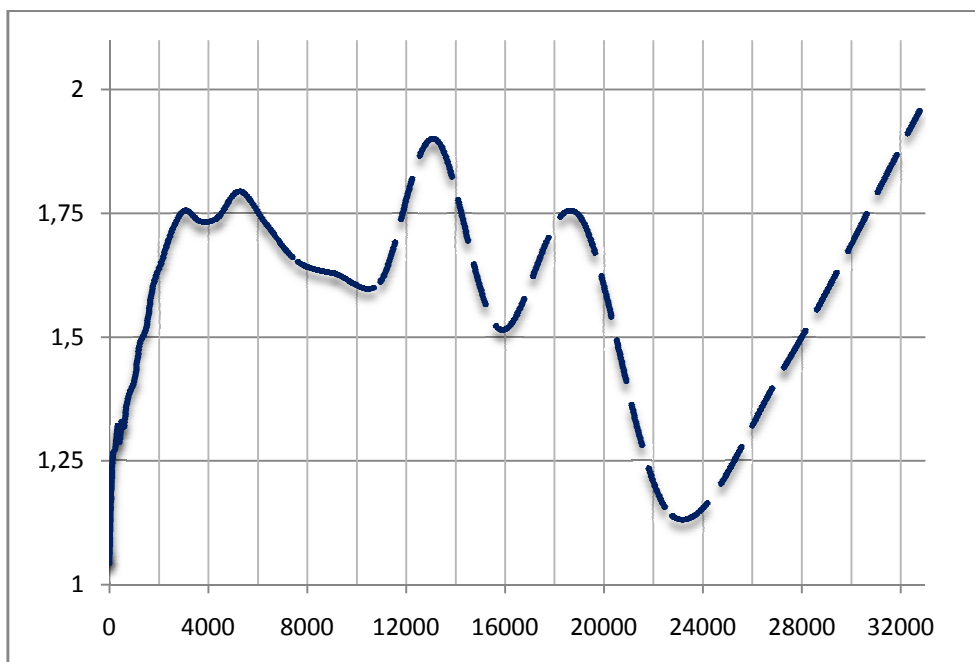
La fonction Desserte montre le réseau relié au point d'origine que l'on indique et aussi les deadlines (bout de lignes) et aussi le réseau qui n'est pas relié. C'est à partir de cette fonction que nous avons calculé les statistiques sur la jointure des lignes présenté en amont, dans la phase de préparation des données.

## Résultats de l'Analyse Fractale

Pour Rappel, tous les résultats présentés ci-dessous sont issus de la méthode box counting sur les données vectoriels du réseau et du bâti le cas échéant. Les paramètres du box-counting sont un coefficient de 1,2 ; une taille minimal de boite de 3 et une taille maximal de boite de 32800 ou de 27300 ; un gliding grid de 3.



**Figure 4.1 :** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique du Jura  
*Dimension fractale : 1,367       $R^2 : 0,989697$*

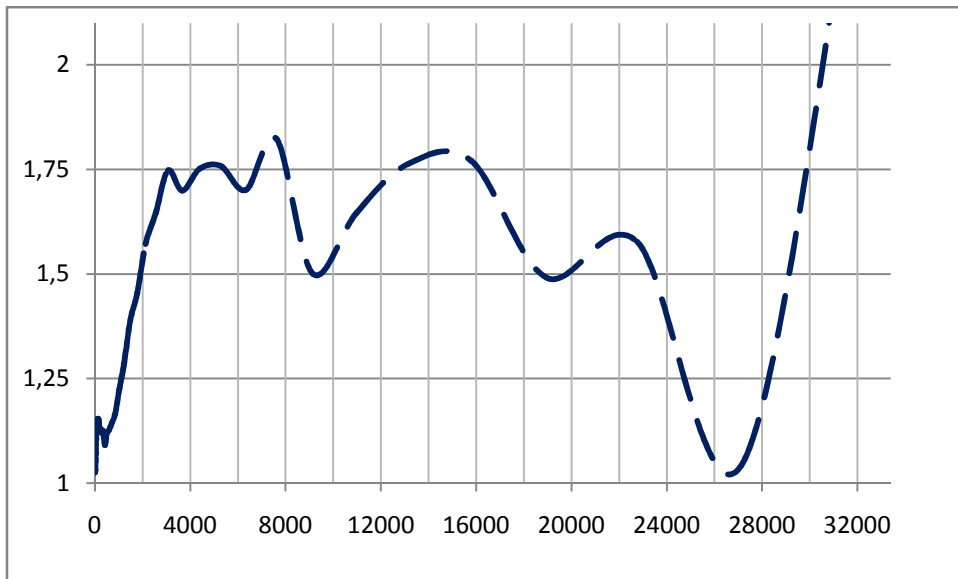


**Figure 4.2** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique de la Haute-Saône  
*Dimension fractale : 1,348       $R^2 : 0,991383$*

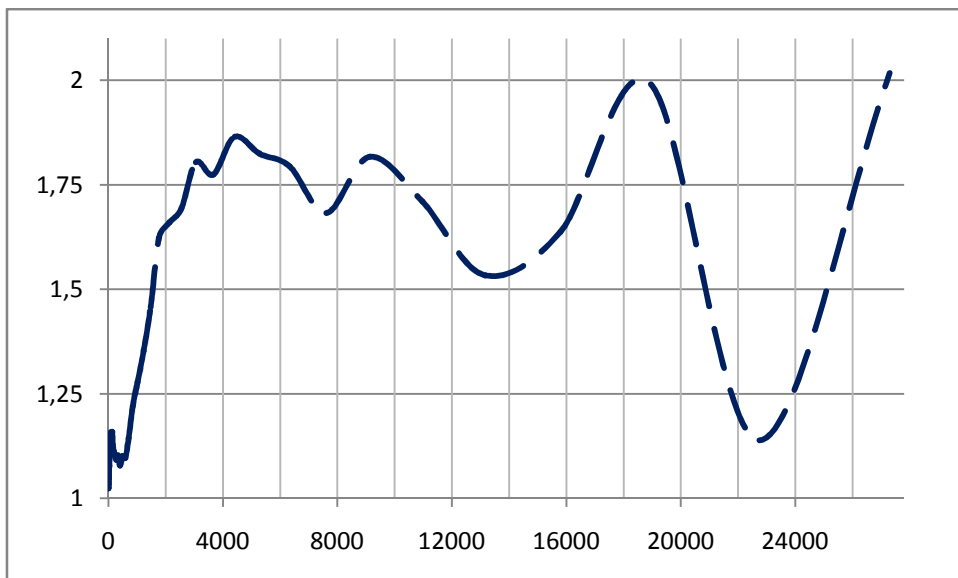
Cette première analyse sur l'ensemble du réseau de distribution d'électricité de chaque département montre en premier lieu une forte similitude entre les deux dimensions fractales, celle de la Haute-Saône tendant légèrement plus vers 1.

On compte dans les deux cas:

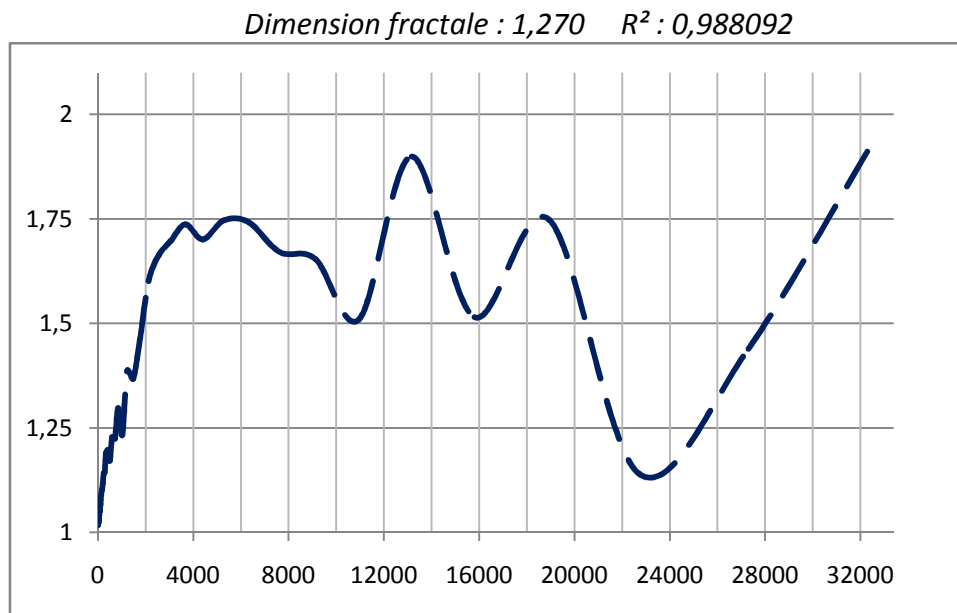
- une première phase de forte augmentation de la dimension fractale, jusqu'à l'atteinte du palier des 1,75 au bout de 2000m. Le phénomène est simple, à petite échelle le réseau est très linéaire, plus on change d'échelle et plus on distingue les bifurcations, croisements et autres.
- une seconde phase d'entrée en oscillation qui débute à 6000m.



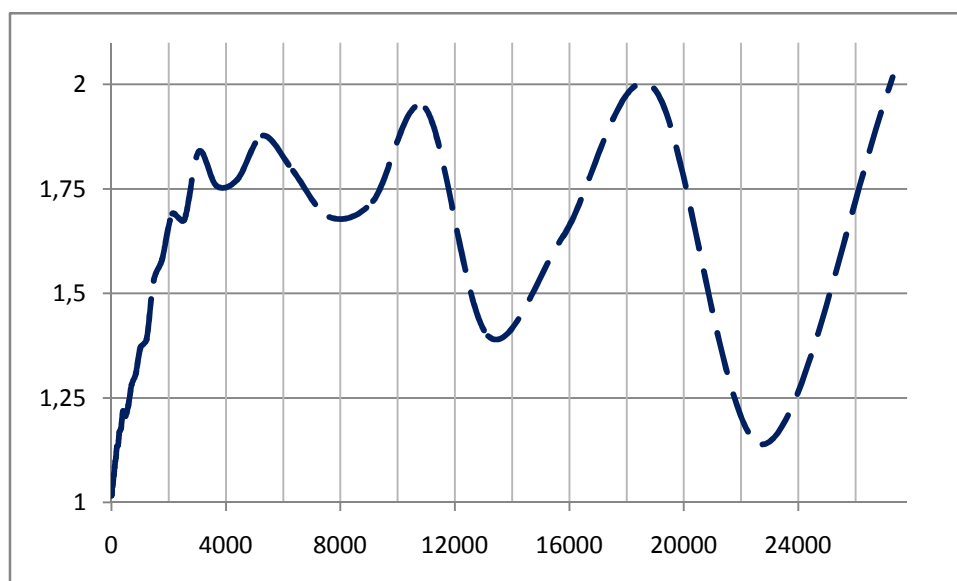
**Figure 4.3** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique BT de la Haute-Saône  
*Dimension fractale : 1,260  $R^2 : 0,989740$*



**Figure 4.4** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique BT du Jura



**Figure 4.5** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique HTA de la Haute-Saône  
*Dimension fractale : 1,257 R<sup>2</sup> : 0,988792*



**Figure 4.6** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique HTA du Jura  
*Dimension fractale : 1,280 R<sup>2</sup> : 0,986595*

En décomposant les réseaux pour chaque département, on obtient dans la globalité le même résultat. On peut noter le même type de comportement scalant en deux phases : le respect du palier des 1,75 et la phase d'oscillation ensuite. Les dimensions fractales sont plus basses. Il semble qu'il faille interpréter cette plus petite dimension non pas comme le fait que les réseaux soient plus linéaires mais par le fait qu'ils sont moins surfaciques. Et c'est logique, le réseau ne passe pas aux mêmes endroits, la BT et la HTA ensemble couvrent donc plus de surface.

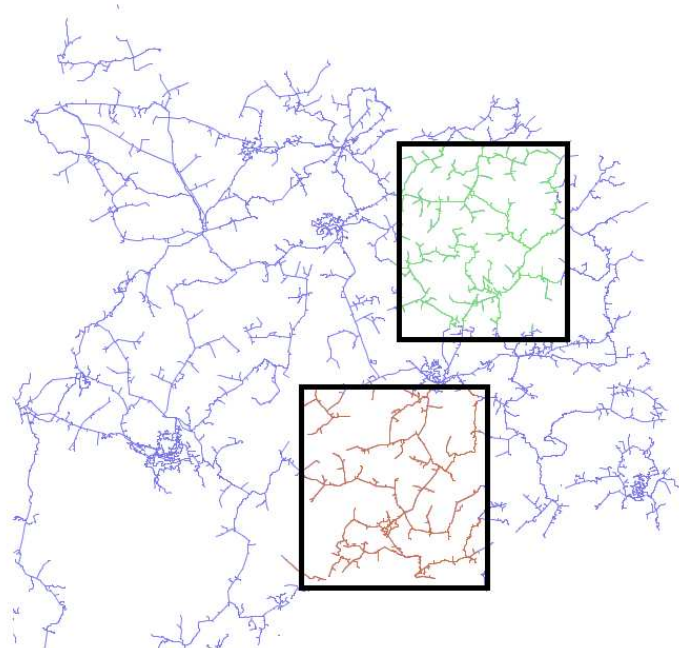
Ce phénomène d'oscillation est tout à fait typique et n'a été observé dans aucun comportement scalant dans nos diverses recherches bibliographiques. Il semble que nous soyons en présence d'un phénomène structurant le réseau sans que l'on puisse directement le définir.

De ses oscillations nous pouvons mettre en évidence 3 seuils.

- Un seuil haut entre 11 000 m et 13 000 m.
- Un seuil haut aux alentours des 18 000 m.
- Un seuil bas à 23 000m.

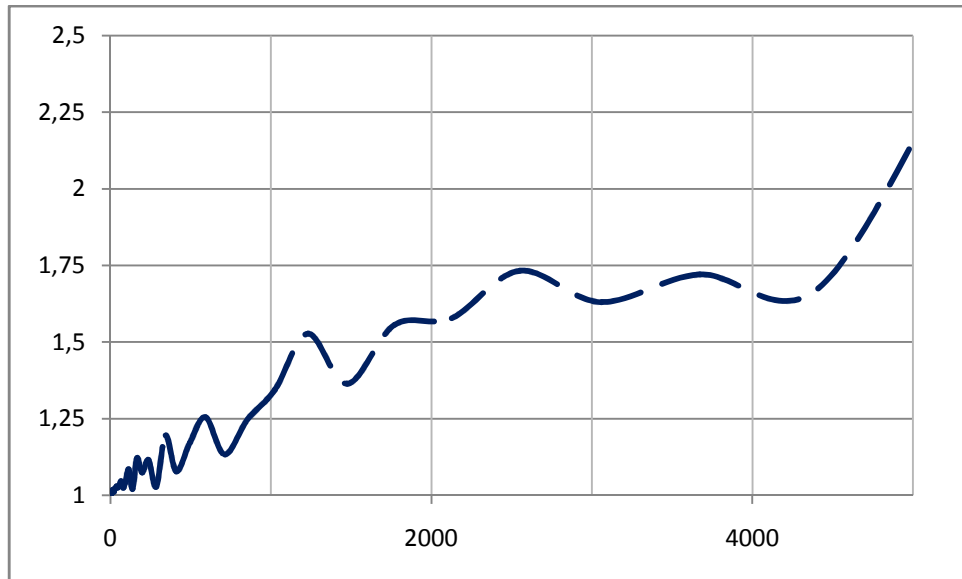
L'étude de ses 3 seuils est à approfondir, dans l'optique de la compréhension de ce phénomène structurant.

Après l'analyse globale des réseaux, nous avons effectué des sélections dans FracGis dans le But de faire une analyse plus locale. Nous avons sélectionné deux zones : la plaine de Vesoul et les Vosges Saônoises comme on peut le voir ci-dessous.

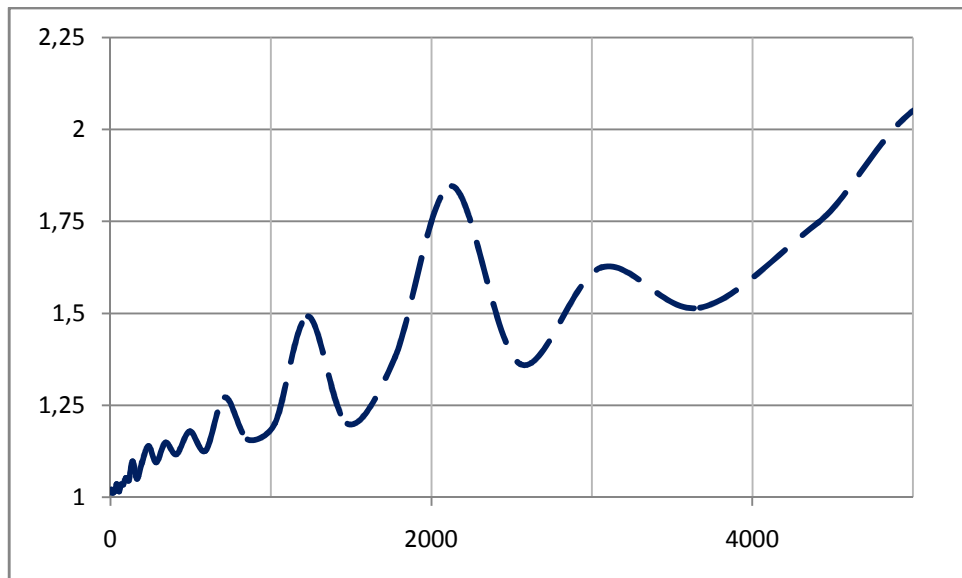


**Figure 4.7** Étendu et localisation des sélections dans la Haute-Saône

Cet exemple représente le réseau HTA. Il faut considérer que la sélection est la même pour la BT et le bâti ensuite.



**Figure 4.8** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique HTA des Vosges Saônoises  
*Dimension fractale : 1,149  $R^2 : 0,992317$*

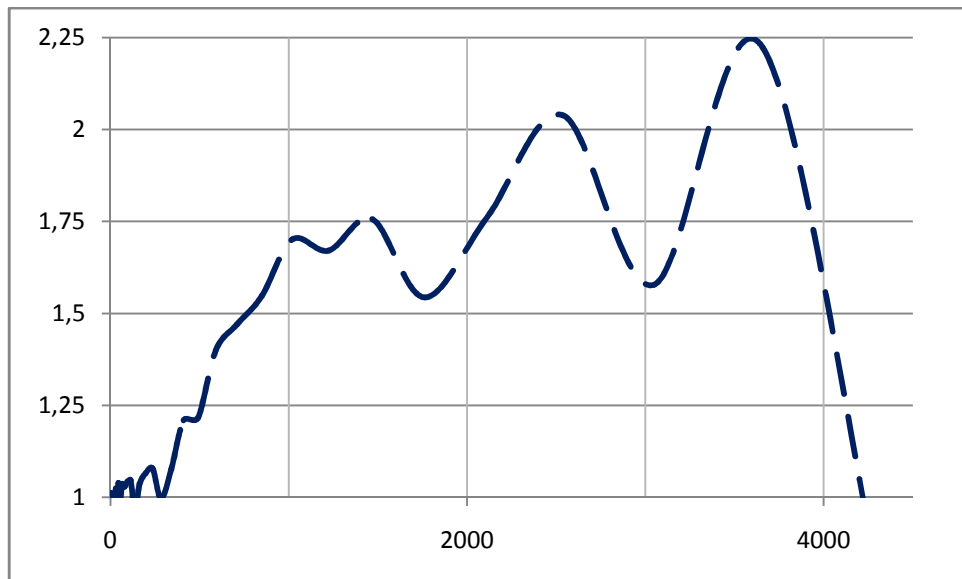


**Figure 4.9** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique HTA de la plaine de Vesoul  
*Dimension fractale : 1,145  $R^2 : 0,993531$*

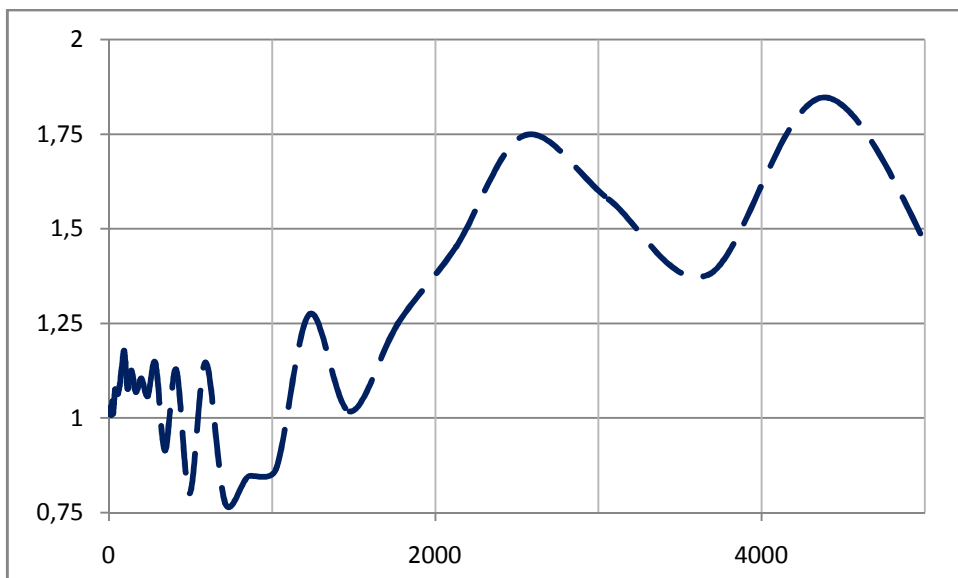
Sur les deux sélections, la dimension fractale est quasiment identique. Néanmoins leur comportement scalant est quelque peu différent.

Dans la première sélection, le réseau est plutôt homogène en ce sens qu'il atteint le palier des 1.75 de façon assez linéaire et qu'en suite là encore la courbe reste assez linéaire jusqu'à 4500m.

Dans la sélection 2, le comportement scalant n'est pas linéaire. Il est plutôt alternatif et oscille entre des hauts et des bas. Il y a donc dans la zone de la sélection 2 une répartition différente de la HTA que dans la zone de la sélection 1, alors que la structure reste globalement identique.



**Figure 4.10** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique BT des Vosges Saônoises  
*Dimension fractale : 1,129 R<sup>2</sup> : 0,989974*

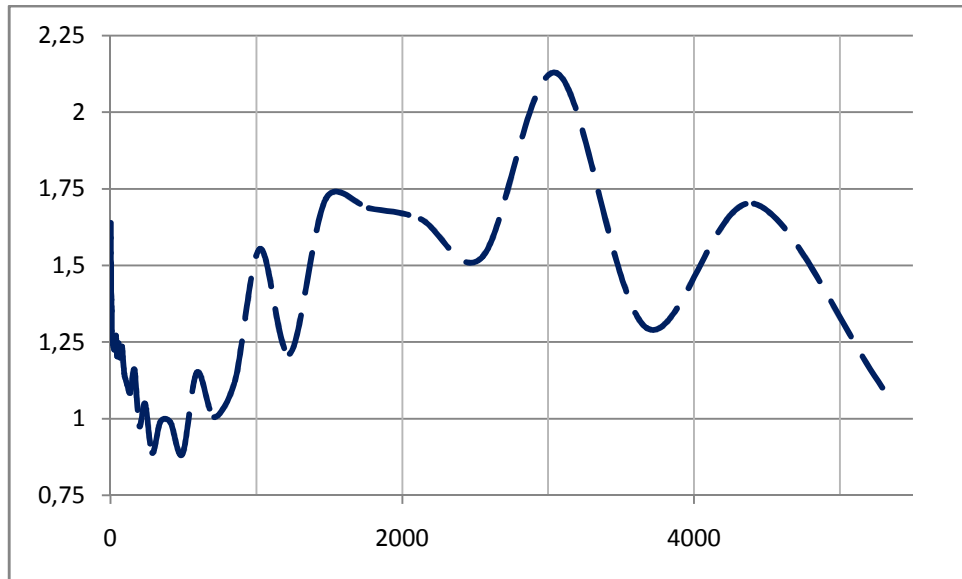


**Figure 4.11** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique BT de la plaine de Vesoul  
*Dimension fractale : 1,078 R<sup>2</sup> : 0,997960*

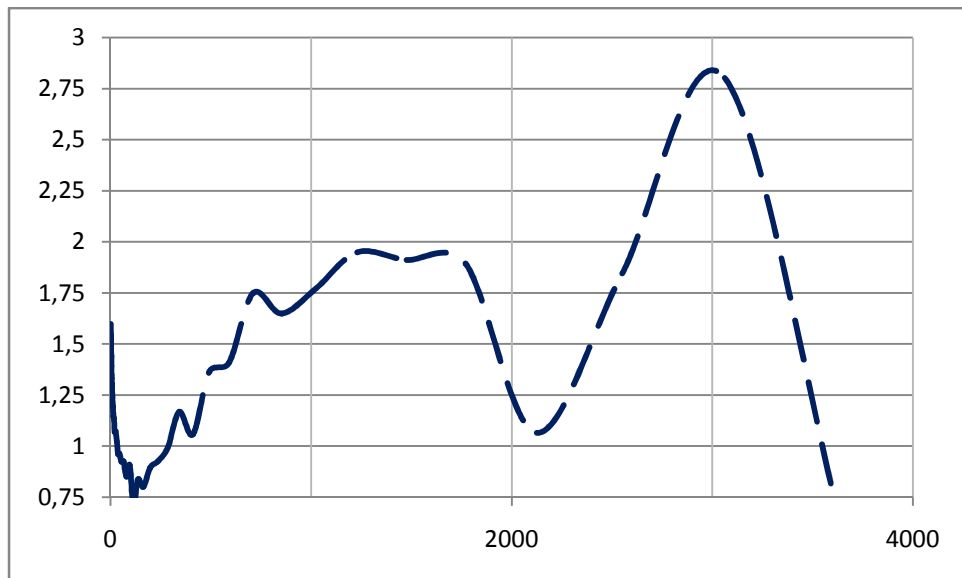
En comparant les réseaux BT des deux sélections, on obtient cette fois-ci plus de différence. Les dimensions sont assez éloignées l'une de l'autre.

Celle de la plaine de Vesoul tendant plus franchement vers 1. Son comportement scalant donne entre 800 et 1000m des valeurs inférieures à 1. Le réseau à cette échelle est ponctuel, plus concentré que linéaire en somme.

La sélection 1 a un comportement plus comparable à celui de l'échelle départementale, une augmentation linéaire jusqu'au palier de 1,75 et la phase d'oscillation. Pas de phénomène remarquable pour cette sélection.



**Figure 4.12** Courbe du Comportement Scalant du bâti de la plaine de Vesoul  
*Dimension fractale : 1,224 R<sup>2</sup> : 0,996623*



**Figure 4.12** Courbe du Comportement Scalant du bâti des Vosges Saônoises  
*Dimension fractale : 1,166 R<sup>2</sup> : 0,987067*

Là encore le bâti des deux zones sélectionnées présente des divergences dans leur dimension fractale et dans leur comportement scalant. Si dans la plaine de Vesoul on peut noter des fluctuations entre 500 et 1500m cela est dû à l'alternance entre zone de bâti et zone agricole, phénomène que l'on ne retrouve pas dans la zone vosgienne. Sa dimension fractale est beaucoup plus basse ce qui joint ce qu'on imaginait avec son comportement scalant, le fait que le bâti est plus diffus, moins concentré, mais mieux réparti.

On distingue une corrélation entre la courbe du comportement scalant de la sélection de bâti et celle de la sélection du réseau BT. Le réseau BT est donc à ce niveau d'échelle interdépendant de la répartition du bâti.



De ces premières analyses nous pouvons mettre en avant quelques résultats :

Un phénomène structurant anime le réseau à l'échelle d'un département. Ce phénomène même si en l'état nous échappe en parti, peut être caractérisé par 3 seuils de distances. Un palier à la dimension fractale 1,75 caractérisé quasiment tout les réseaux.

Les réseaux HTA, BT ou combiné respecte cette structure.

On note à échelle locale que le réseau BT se corrèle à la morphologie du Bâti, ce que le réseau HTA fait beaucoup moins, respectant sa structure et son tracé propre.

Après avoir étudié l'échelle globale et locale, nous avons finalement étudié la fractalité du réseau électrique d'aires urbaines telles que définies dans la sélection par méthode radiale. Les aires urbaines sont listées dans le tableau ci-dessous ainsi que les valeurs de la dimension fractale de leur bâti et de leur réseau électrique.

	D network	D surface	Bêta
St Claude	1,369	1,468	1,072
Luxeuil	1,373	1,543	1,124
Gray	1,381	1,521	1,101
Champagnole	1,408	1,516	1,077
Héricourt	1,409	1,587	1,126
Lure	1,409	1,58	1,121
Vesoul	1,429	1,61	1,127
Dole	1,447	1,595	1,102
Lons	1,465	1,616	1,103

où

$$\beta \equiv \frac{D_{Surf}}{D_{Netw}}$$

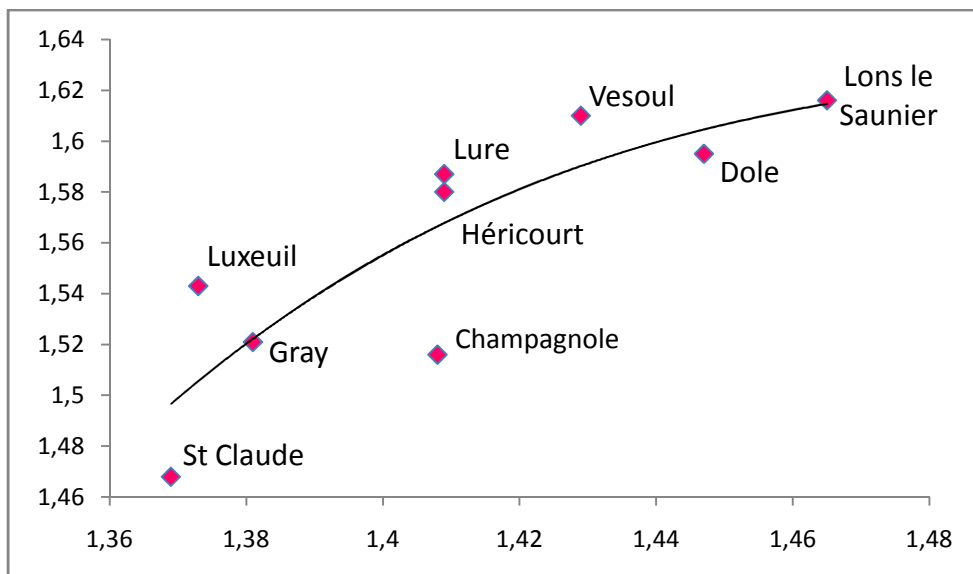


Figure 4.13 Répartition des aires urbaines suivant leurs dimensions fractales

Le calcul du rapport entre la dimension fractale du bâti et celle du réseau, donne un indicateur fort sur la situation du réseau.

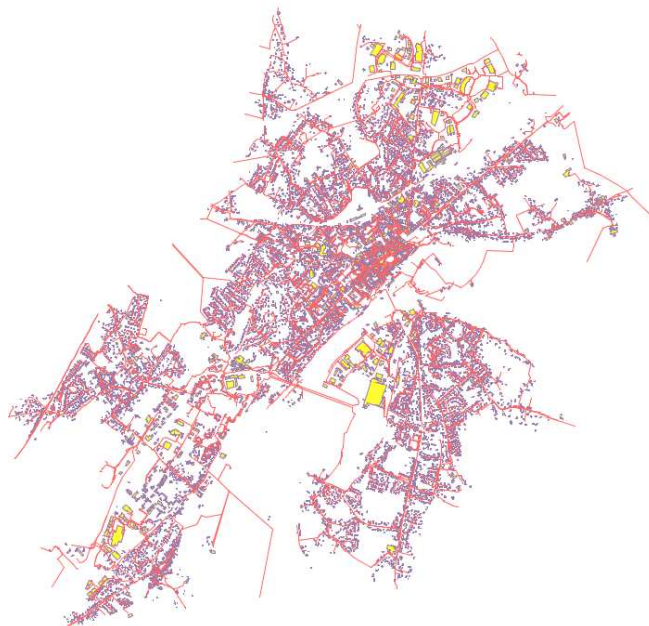
On distingue ainsi 3 types d'aires urbaines suivant cet indicateur :

Type 1 : St Claude, Champagnole. Le rapport entre réseau et bâti est très faible, il faut beaucoup plus de réseau que dans les autres types pour desservir tout les bâtiments. C'est le type pour lequel le rendement du réseau est le moins bon.



**Figure 4.14** Exemple de Champagnole pour le type 1

Type 2 : Dole, Lons, Gray. Le rapport entre le réseau est moyen. La dimension fractale du réseau est élevée mais cela est largement compensé par la dimension fractale élevée du réseau pour Dole et Lons. Pour Gray la dimension fractale du réseau est basse mais celle du bâti aussi.



**Figure 4.15** Exemple de Dole pour le type 2

Type 3 Lure, Luxeuil, Héricourt, Vesoul. Le rapport entre le réseau et le bâti est élevé. Peut importe la dimension fractale du bâti, haute ou basse, celle du réseau est systématiquement beaucoup plus basse. C'est le type pour lequel le rendement du réseau est le meilleur.



**Figure 4.16** Exemple de Lure pour le type 3

Cette typologie en 3 classes interroge sur les facteurs qui déterminent la classification telle qu'on la découvre. On aurait pu s'attendre à une hiérarchie en fonction de la taille de l'aire urbaine mais l'exemple de Dole et Gray et Vesoul indique que ce n'est pas un facteur déterminant au premier abord.

Des facteurs morphologiques et/ou historiques sont sans doute en jeu. Néanmoins la répartition des villes suivant leur type montre une disposition spatiale nette et homogène. L'Ouest pour le type 2, la moyenne montagne pour le type 1 et l'Est pour le type 3.

Le type 3 a donc le meilleur rendement concernant la proportion de réseau par rapport à la proportion de bâti. Cela implique lors de la construction une optimisation de la longueur de réseau à poser et lors de l'exploitation une optimisation de longueur de réseau à gérer. Soit en premier lieu un gain d'argent qui peut être de ce fait redistribué à d'autres besoins et aussi moins risque d'agression du réseau. Cependant moins de réseau implique aussi un plus fort impact en aval lors d'une agression.

Pour étudier cet équilibre entre optimisation et sécurité nous avons étudié pour les villes de type 3 la desserte du réseau et son maillage par la fonction Backbone de FracGIS.

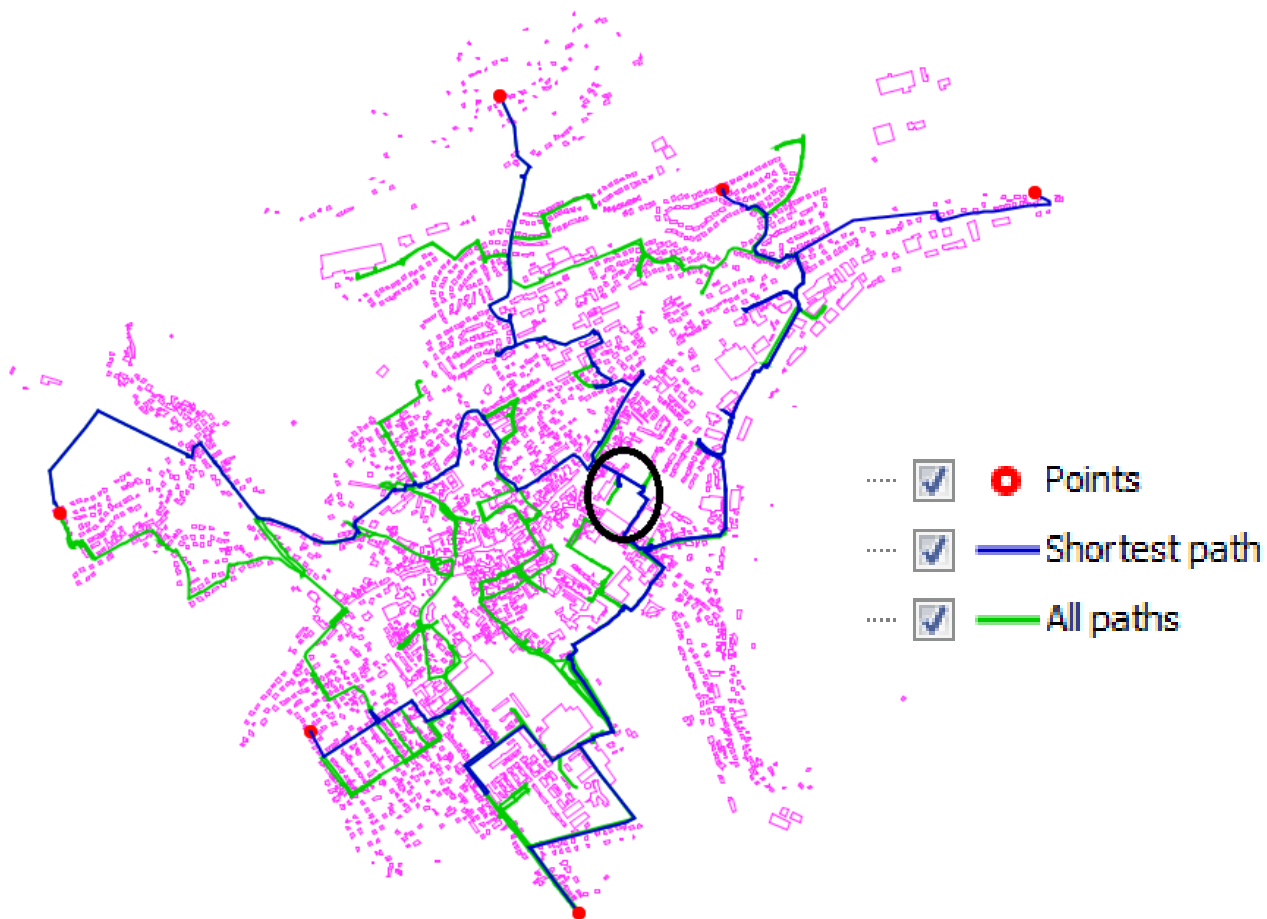


Figure 4.17 Analyse Network de Héricourt, exemple pour le type 3

Dans cet exemple, nous avons indiqué plusieurs points de départ et plusieurs points d'arrivée correspondant à la traversée de la ville d'Héricourt d'Est en Ouest. On voit donc les plus courts chemins ou chemin de moindre coût et les autres chemins possibles.

On distingue nettement au centre de l'aire urbaine un tronçon unique qui sert de chemin de moindre coup à tous les trajets. C'est plutôt négatif au premier abord pour la sécurité du réseau si celui-ci tombe en panne. Mais ce que l'on voit ensuite c'est que les autres chemins possibles forment un maillage assez homogène capable de prendre le relais et d'assurer ainsi la sécurité d'approvisionnement.

Cet exemple illustre le fait que malgré son optimisation le réseau reste néanmoins assez bien maillé et que cette optimisation de longueur et de répartition ne s'est pas faite au détriment de la sécurité.

Les villes de Type 3 sont une première étape dans la piste à suivre pour identifier les éléments qui conduirait à un réseau théorique cible.

## Liste des Figures

**Figure 1.1** : Répartition et Segmentation du marché de l'électricité

**Figure 1.2** : Caractéristiques non-exhaustives régies par la norme NF EN 50160

**Figure 1.3** : Puissance électrique générée par une éolienne de 1,5 MW sur 10h

**Figure 1.4** : Caractéristiques des réseaux électriques

**Figure 2.1** : Exemples de structures fractales construites à partir de systèmes itérés

**Figure 2.2** : Comparaison entre dimension topologique et dimension fractale (Kaye, 1994).

**Figure 2.3** : Les dimensions fractionnaires

**Figure 3.1** : Géométrie des réseaux électriques

**Figure 3.2** : Script Points vers lignes dans ArcGIS

**Figure 3.3** : Jointure des lignes du réseau électriques

**Figure 3.4** : Exemple sur l'aire urbaine de Vesoul

**Figure 3.5** : Courbe du comportement scalant de l'aire urbaine de Vesoul

**Figure 3.6** : Modelbuilder de préparation des données.

**Figure 3.7** : Planarisation des lignes dans la mise à jour avancée

**Figure 3.8 et 3.9** : Données obtenues après traitement, réseau et bâti ville de Dole.

**Figure 3.10** : Analyses vectorielles de FracGIS

**Figure 3.11** : Paramètres de la fonction Box Counting

**Figure 3.12** : Les outils de FracGIS

**Figure 3.13** : Les fonctions réseau dans FracGIS

**Figure 4.1** : Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique du Jura

**Figure 4.2** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique de la Haute-Saône

**Figure 4.3** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique BT de la Haute-Saône

**Figure 4.4** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique BT du Jura

**Figure 4.5** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique HTA de la Haute-Saône

**Figure 4.6** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique HTA du Jura

**Figure 4.7** Étendu et localisation des sélections dans la Haute-Saône

**Figure 4.8** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique HTA des Vosges Saônoises

**Figure 4.9** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique HTA de la plaine de Vesoul

**Figure 4.10** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique BT des Vosges Saônoises

**Figure 4.11** Courbe du Comportement Scalant du réseau électrique BT de la plaine de Vesoul

**Figure 4.12** Courbe du Comportement Scalant du bâti de la plaine de Vesoul

**Figure 4.12** Courbe du Comportement Scalant du bâti des Vosges Saônoises

**Figure 4.13** Répartition des aires urbaines suivant leurs dimensions fractales

**Figure 4.14** Exemple de Champagnole pour le type 1

**Figure 4.15** Exemple de Dole pour le type 2

**Figure 4.16** Exemple de Lure pour le type 3

**Figure 4.17** Analyse Network de Héricourt, exemple pour le type 3

## Bibliographie

- ENACHEANU Octavian, *Modélisation fractale des réseaux électriques*, 2008, Université Joseph Fourier-Grenoble I.
- ERDF, *Description physique du réseau public*, 2008
- FRANKAUSER Pierre, THOMAS Isabelle, *Fractal dimensions of the built-up footprint: Buildings versus roads. Fractal evidence from Antwerp (Belgium)*, 2013, in Environment and Planning B: Planning and Design.
- FRANKHAUSER Pierre, *La morphologie des tissus urbains et périurbains à travers une lecture fractale*, 2005, in Revue géographique de l'Est.
- FRANKHAUSER Pierre, GENRE-GRANDPIERRE Cyrille; *La géométrie fractale - un nouvel outil pour évaluer le rôle de la morphologie des réseaux de transport public dans l'organisation spatiale des agglomérations*, 1998, les Cahiers Scientifiques du Transport.
- FRANKHAUSER Pierre, *De l'analyse morphologique au concept d'aménagement l'utilisation de l'approche fractale en géographie urbaine*, 2013, ThéMA.
- FRANKHAUSER Pierre, *La « ville fractale » et la fractalité des villes*, 2002, in La ville émergente : Résultats de recherches.
- GENRE-GRANDPIERRE Cyrille, *Forme et fonctionnement des réseaux de transport : approche fractale et réflexions sur l'aménagement des villes*, 2000, ThéMA.
- GENRE-GRANDPIERRE Cyrille. *La desserte spatiale des réseaux de transport routier : une approche fractale*. In: Flux, n°38, 1999. pp. 56-68.
- LETHI Tinh-Minh, *Modélisation dynamique des réseaux d'énergie électrique tenant compte des propriétés d'invariance d'échelle*, 2014, G2LAB.
- THOMAS Isabelle, FRANKHAUSER Pierre, BIERNACKI Christophe, 2008, "The morphology of built-up landscapes in Wallonia (Belgium): a classification using fractal indices" *Landscape and Urban Planning*.
- THOMAS Isabelle, FRANKHAUSER Pierre, BADARIOTTI Dominique, *Comparing the fractality of European urban neighbourhoods: do national contexts matter?*, 2010.

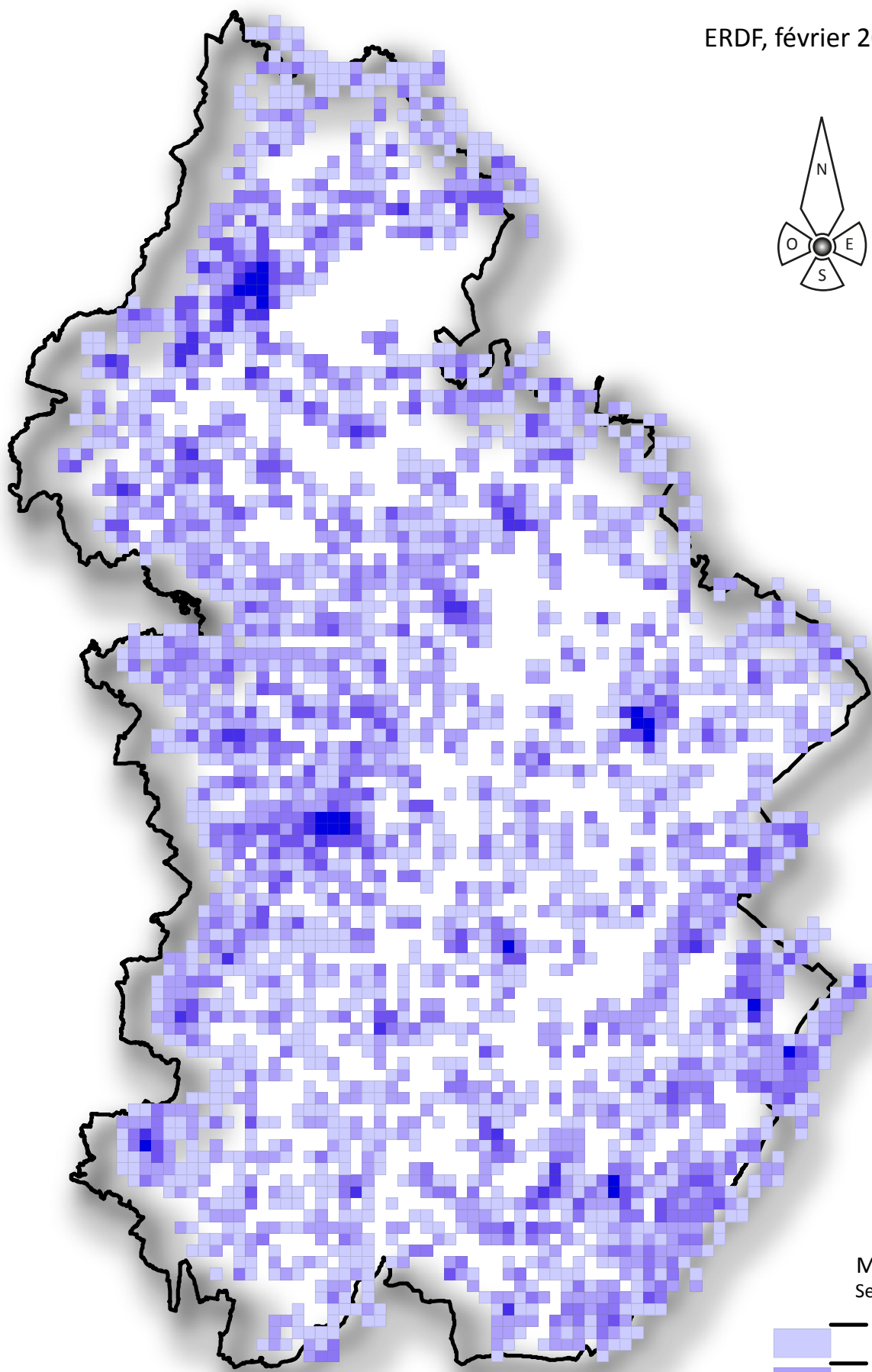
- THOMAS Isabelle, FRANKHAUSER Pierre, FRENAY Benoit, VERLEYSEN Michel, *Clustering patterns of urban built-up areas with curves of fractal scaling behaviour*, 2010, in Environment and Planning B: Planning and Design.
- Union Française de l'Electricité, *Rapport du GT « Réseaux intelligents »*, 2010.

## Sitographie

- erdf.fr
- edf.fr
- rte.fr
- cre.fr
- smartgrids-cre.fr
- sicae-est.com

# Densité du réseau Basse Tension (400/230 Volts) dans le Jura

ERDF, février 2016



Mètre / Kilomètre<sup>2</sup>  
Seuils naturels de Jenks

