

Projet de Fin d'Études (PFE) 2022-2023

Risque incendie au sein du réseau électrique



Baptiste Berthillot

Sous la direction de Mathilde Gralepois en collaboration avec Minjid Maïzia

Risque incendie au sein du réseau électrique

Construire la ville résiliente. Intégrer les réseaux urbains électriques
dans les projets d'aménagement en Zone Incendie

Baptiste Berthillot

**Directeurs de recherche : Mathilde Gralepois en
collaboration avec Minjid Maïzia**

2022-2023

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

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

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

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

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

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

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

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à ma professeure, Mme.Gralepois qui m'a orienté et aidé dans mes recherches. Ses conseils et ses références m'ont permis de cibler mes objectifs et de structurer mon travail.

Je tiens aussi à remercier M.Maïzia pour m'avoir beaucoup aidé dans la réalisation de ma modélisation. Ses nombreuses aides m'ont permis d'apprendre beaucoup et d'obtenir la représentation attendue. Sa disponibilité et sa réactivité m'ont permis d'avancer de manière régulière.

Enfin, je souhaite remercier Enedis du quartier des Fontaines de Tours et plus particulièrement M. Jean François Thiel et M. Kevin Marteau. Leurs attentes et leurs suggestions durant nos rencontres ont permis de nourrir mon travail.

SOMMAIRE

Introduction.....	9
A. La ville, un lieu de concentration des enjeux.....	11
B. Résilience urbaine, une nouvelle approche de la gestion des risques.....	11
C. Le cas de l'inondation	12
I. Les réseaux électriques face au risque incendie	14
A. Le risque incendie	14
1. L'incendie dit « interne »	15
2. L'incendie externe.....	15
B. Aléa incendie	15
C. Vulnérabilité	17
1. Réseaux électriques : structure et enjeux	17
2. Vulnérabilité face aux incendies	19
D. Etat de l'art des dispositions actuelles	19
1. En amont.....	19
E. Application concrète/situation en France	22
1. A l'échelle nationale.....	22
2. A l'échelle de l'Indre-et-Loire.....	23
II. Exercice de modélisation	24
A. Rappels	24
B. Définitions et application de la méthode	24
1. L'aléa	24
2. La vulnérabilité du réseau.....	25
3. Outils utilisés pour cette modélisation	25
4. Description de la démarche	25
5. Structure du calcul	30
6. Analyse des résultats	31
7. Perspectives	34
III. Pertinence de l'évaluation de la résilience	38
Conclusion	40

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Mix de la consommation d'énergie finale en France en 2015 – Connaissances des énergies	10
Figure 2: Projection de la consommation d'électricité annuelle en France et effet du scénario sur les émissions nationales et l'empreinte carbone – Rte France	10
Figure 3: Représentation schématique de la résilience urbaine – Journal Open Edition	12
Figure 4: Triangle du feu – blog Extincteur	14
Figure 5: Sensibilité au risque feux de forêt des formations végétales – Préfecture région Centre Val de Loire (Direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement).....	16
Figure 6: Aléa incendie autour de la commune de Chinon – Baptiste Berthillot	16
Figure 7: Structure du réseau électrique – Carbone 4	17
Figure 8: Etat d'avancement des plans de prévention du risque incendie feu de forêt – Ministère de la transition écologique.....	22
Figure 9 : Aléa incendie autour de la commune de Chinon – Baptiste Berthillot	24
Figure 10 : Réseau électrique de distribution de la ville de Chinon – Baptiste Berthillot.....	25
Figure 11 : Exemple d'extrémité du réseau électrique de Chinon – Baptiste Berthillot.....	26
Figure 12 : Exemple d'un poste de distribution avant et après correction – Baptiste Berthillot.....	26
Figure 13 : Poste source du réseau électrique de Chinon – Baptiste Berthillot.....	27
Figure 14 : Aléa incendie au sein du réseau électrique de Chinon – Baptiste Berthillot	28
Figure 15 : Vulnérabilité du réseau électrique de Chinon – Baptiste Berthillot.....	29
Figure 16 : Risque incendie du réseau électrique de Chinon – Baptiste Berthillot.....	30
Figure 17 : Algorithme du calcul d'aléa – Baptiste Berthillot.....	30
Figure 18 : Algorithme du calcul de vulnérabilité – Baptiste Berthillot	31
Figure 19 : Algorithme du calcul de risque – Baptiste Berthillot.....	31
Figure 20 : Aléa incendie du réseau électrique de Chinon et zonage incendie initial – Baptiste Berthillot.....	32
Figure 21 : Vulnérabilité du réseau électrique au niveau du centre-ville de Chinon – Baptiste Berthillot	32
Figure 22 : Comparaison des trois cartes obtenues – Baptiste Berthillot.....	33
Figure 23 : Massifs boisés et communes d'Indre-et-Loire exposés au risque incendie – Préfecture d'Indre-et-Loire	36

Introduction

En cette seconde décennie du 21^{ème} siècle, l'urgence climatique se fait de plus en plus ressentir. Le temps du questionnement autour de la véracité du dérèglement du climat est définitivement révolu et les effets concrets sont progressivement impactants pour l'ensemble des habitants de la Terre. Nos émissions sont le facteur majeur du réchauffement progressif de la planète et il devient essentiel de le limiter pour la survie de l'espèce humaine. Néanmoins, face à l'inertie du phénomène et notre manque criant de réaction, nous n'avons d'autres choix que d'adapter nos modes de vie aux nouvelles conditions climatiques. Parmi l'ensemble de ces conditions, nous devons porter une attention toute particulière aux catastrophes climatiques. L'absence de prise en compte de ce type d'évènement peut être dévastatrice et causer de lourdes pertes.

On estime aujourd'hui que la température terrestre s'est élevée en moyenne de 1,1°C depuis 1750 (Rapport du Giec, 2021). Cette augmentation s'intensifie à mesure que les années passent et que nos émissions de CO₂ augmentent. Si cet écart peut sembler dérisoire à l'échelle d'une journée de vie humaine (durant laquelle on peut observer des variations beaucoup plus importantes), à l'échelle de la planète, il est déterminant. Par exemple, on sait que « le niveau moyen de la mer s'est élevé plus vite depuis 1900 qu'au cours de tous les autres siècles depuis 3000 ans. » (Rapport du Giec, 2021). Une autre conséquence majeure est la multiplication des « événements météorologiques extrêmes » parmi lesquels on retrouve les sécheresses, inondations, incendies, etc... (Rapport du Giec, 2021)

Dans un rapport publié en 2020, le bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophes compare le nombre de catastrophes climatiques survenues sur la période 1980-1999 et 2000-2019. On passe alors de 4212 à 7348 catastrophes qui ont affectées respectivement 3,25 billions et 4.03 billions de personnes. L'exemple le plus parlant est d'ailleurs le nombre d'inondations puisque l'on passe de 1389 à 3254 soit une croissance de plus de 134%. Côté incendie, l'augmentation correspond environ à un doublement de leur nombre avec 46% de croissance (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters & United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2020).

De nombreuses trajectoires de réchauffements sont modélisées dans divers travaux scientifiques. Ils prennent en considération l'évolution de nos émissions passées et actuelles pour prévoir celles futures. Ainsi, les plus optimistes prévoient 1,4°C de réchauffement de la température moyenne au 21^{ème} siècle à l'horizon 2100 tandis que les plus pessimistes planchent plutôt sur 4.4°C de réchauffement. Les scénarios décrits comme les plus probables sont ceux intermédiaires qui oscillent entre 1.8 et 3.6°C (Rapport du Giec, 2021). De tels réchauffements vont nécessairement augmenter la fréquence des catastrophes climatiques de manière encore plus intense que lors des 4 dernières décennies comme vu précédemment. Au-delà d'un réchauffement supérieur à 3°C, les stratégies locales et nationales en matière de réduction des risques naturels seront très probablement obsolètes et l'espèce humaine tout entière sera fortement exposée (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters & United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2020).

On peut donc voir que toutes les questions de gestion des risques, qui sont déjà prises en compte (par les institutions françaises publiques, cf. partie I.D), seront encore davantage centrales dans un futur proche. Il va falloir limiter au mieux le risque pour les populations mais également pour les infrastructures. C'est donc dans ce cadre que s'inscrit ce travail. Il soulève ainsi la question de l'exposition des réseaux électriques au dérèglement climatique et donc à la multiplication des catastrophes climatiques. Ce travail a dans un premier temps été centré sur les inondations avant d'être réorienté sur les incendies c'est pourquoi les inondations seront parfois évoquées.

Un autre enjeu majeur lui-même lié à l'urgence climatique est l'appauvrissement des ressources en énergies fossiles que le monde rencontre. Après des décennies d'industrialisation, les énergies fossiles sont aujourd'hui très largement utilisées (91% dans le secteur des transports, 56% pour le chauffage des bâtiments et 51% pour l'industrie)(RTE, 2021). Au contraire, l'électricité n'est pas majoritaire dans le mix de consommation d'énergie finale français.

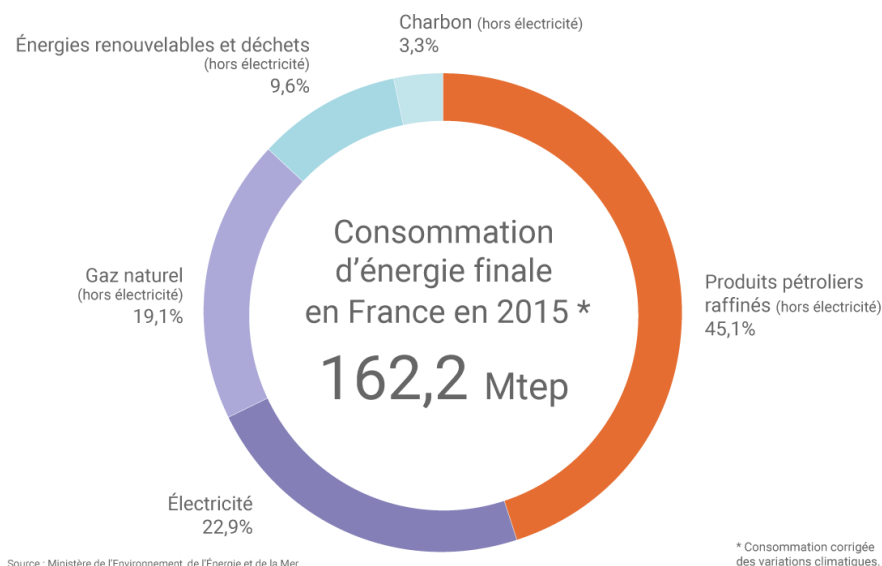


Figure 1 : Mix de la consommation d'énergie finale en France en 2015 – Connaissances des énergies

Ainsi, pour diminuer nos émissions de CO₂, l'ensemble des pays du monde y compris la France se doivent de réduire drastiquement leur consommation d'énergies fossiles (jusqu'à ne plus en consommer idéalement). Pour cela, « il faut donc réduire les consommations et alimenter celles qui restent par des énergies bas-carbone, comme l'électricité »(RTE, 2021). Selon les orientations prises par la France, une augmentation annuelle de 1% de la consommation d'électricité devrait avoir lieu durant 30 ans. On estime alors cette consommation à 645 TWh/an en 2050 contre environ 480 TWh/an aujourd'hui (RTE, 2021). Selon les scénarios, cette consommation varie et pourrait même être encore plus importante si les volontés de réindustrialisation aboutissent. D'après différentes études de la SNBC (Stratégie Nationale Bas Carbone), on pourrait aller à plus de 750 TWh de consommation annuelle d'électricité. A noter que si cette réindustrialisation augmente notre consommation d'électricité, elle permettrait de réduire encore davantage notre empreinte carbone.

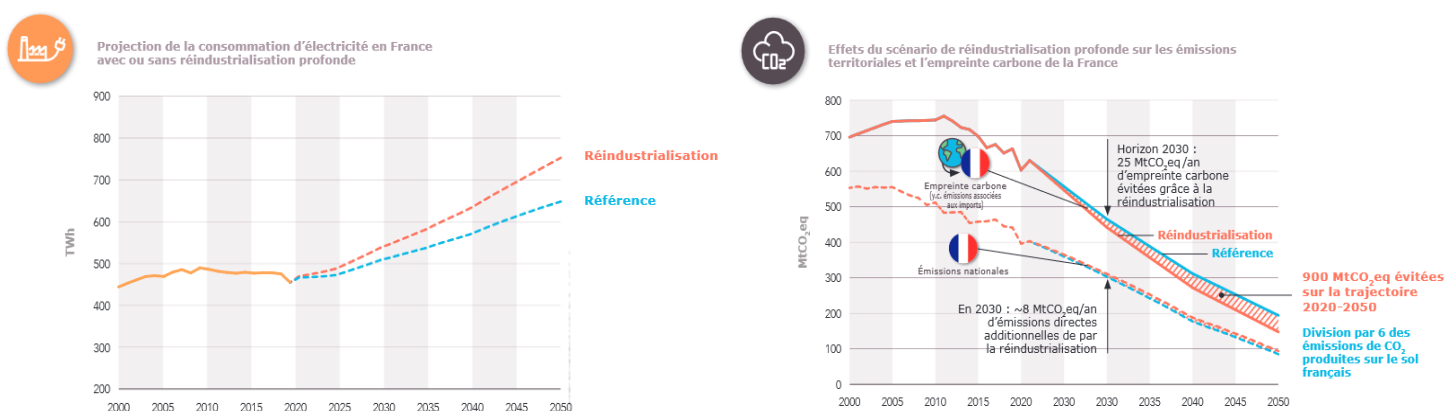


Figure 2 : Projection de la consommation d'électricité annuelle en France et effet du scénario sur les émissions nationales et l'empreinte carbone – Rte France

Dans ce contexte, il apparaît évident que l'électricité sera un des piliers des sociétés futures puisqu'elle représentera probablement la source d'énergie majoritaire. Il est donc absolument essentiel d'être capable de la produire (le plus proprement possible) et il faut être aussi doté d'un réseau performant ayant des capacités d'acheminement suffisantes. La gestion des réseaux électriques face aux aléas climatiques sera alors une question hautement importante. Ce travail s'inscrit donc dans cette logique de prévention des risques incendie ou inondation qui pourraient endommager le réseau électrique. Être en mesure de protéger le réseau en amont et d'étudier son fonctionnement en cas de dégâts sur certaines portions sera un outil fondamental dans les décennies à venir.

A. La ville, un lieu de concentration des enjeux

Depuis la deuxième moitié des années 2000, la population mondiale vit majoritairement en ville. Ce phénomène de croissance des populations urbaines va se poursuivre dans les années à venir et on estime que ce taux de croissance correspond à la construction d'une nouvelle ville d'un million d'habitants par semaine (Serre, 2016b).

Pour répondre à cet afflux d'habitants les villes s'étendent et leurs superficies augmentent. Cet étalement urbain concerne évidemment les bâtiments mais également tous les réseaux techniques urbains dont le réseau électrique. Inévitablement, les zones urbanisées viennent s'implanter dans des zones soumises à des aléas naturels (Serre, 2016b). Or, la ville est un lieu de concentration des activités, des personnes et des biens. Ainsi, la majorité des enjeux de nos sociétés se trouvent en milieu urbain (par exemple nos hôpitaux). Par conséquent, ces phénomènes sociaux (étalements urbains, urbanisation de zones dangereuses) combinés aux aléas (incendie, inondation, etc...) accroissent significativement notre exposition (Serre, 2016b). Dans le futur, cela risque d'être d'autant plus le cas puisque toutes les catastrophes naturelles sont amenées à devenir de plus en plus fréquentes à cause du réchauffement climatique (cf introduction).

Un autre point important relatif aux espaces urbains est la complexité de leurs systèmes techniques. L'organisation de nos villes en réseaux touchent beaucoup de domaines : les transports, l'énergie, les télécommunications ou les déchets par exemple. Ces réseaux sont très sensibles et interdépendants les uns des autres. Une panne d'électricité peut causer d'importantes coupures dans les télécommunications (comme en Italie en 2003 lorsque 57 millions de personnes ont été victimes d'une coupure d'électricité)(Serre, 2016b). En clair, la complexité et les interconnexions propres aux réseaux techniques présentes dans nos villes rendent encore plus fragiles nos sociétés. Lorsqu'un incident survient dans ces réseaux, on déplore un effet boule de neige vers d'autres secteurs. La gestion des risques est donc encore plus compliquée (Serre, 2016b).

Pour faire face à notre exposition croissante, il nous est indispensable de développer de nouvelles stratégies en matière de gestion des risques en milieu urbain. Les dimensions temporelles et spatiales doivent apparaître pour être capables de répondre à tout type d'incident et éviter des catastrophes (Serre, 2016b).

Pour cela, on s'appuie sur un terme précis : la résilience urbaine.

B. Résilience urbaine, une nouvelle approche de la gestion des risques

La résilience est un concept théorique très vaste et dont les différentes définitions diffèrent beaucoup. Dans le cadre de ce travail, nous nous concentrons uniquement sur le concept de résilience

urbaine. Certains chercheurs s'emploient à définir la résilience urbaine comme la « capacité de la ville à absorber une perturbation puis à récupérer ses fonctions à la suite de celle-ci »(Toubin et al., 2012a).

Dans cette définition, la ville est considérée comme un système au sein duquel ses composants (habitats, activités, infrastructures, populations, gouvernance) interagissent. Pour atteindre un niveau maximal de résilience les systèmes urbains s'appuient sur plusieurs leviers : une stratégie technique et une stratégie organisationnelle. On ajoute à ces deux stratégies la capacité du système urbain à fonctionner de manière dégradée et on obtient l'ensemble des dimensions de la résilience urbaine (Toubin et al., 2012a).

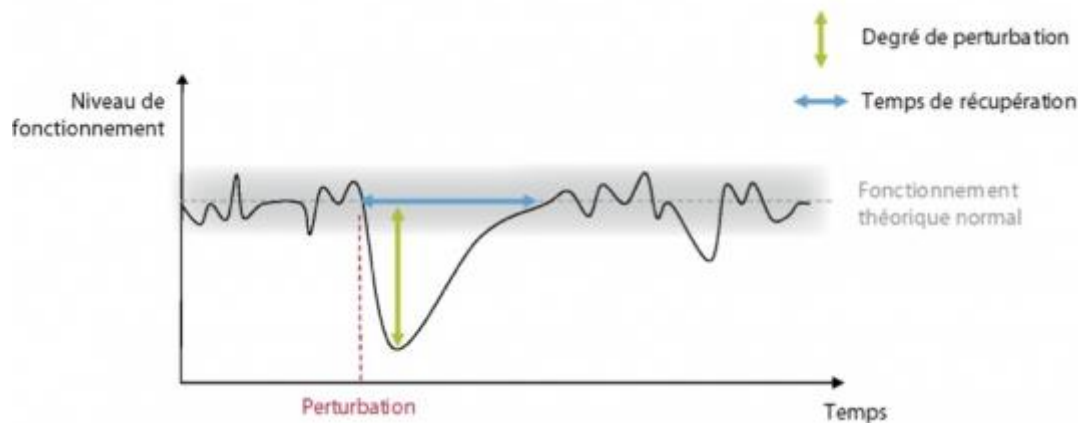


Figure 3 : Représentation schématique de la résilience urbaine – Journal Open Edition

On fait également la distinction entre la résilience à court et à long terme. A court terme, la résilience est simplement la réponse qu'apporte un système à la suite d'une perturbation. On observe également la capacité de fonctionnement du système pendant la perturbation et sa capacité à retrouver un fonctionnement normal (mais pas d'atteindre un retour à l'état initial). A long terme, la résilience exprime plutôt l'idée d'une trajectoire empruntée par le système lorsqu'il est en proie à plusieurs perturbations. « La résilience de temps long correspond alors à une stratégie visant à diminuer les impacts globaux liés aux risques » (Serre, 2013). La distinction de ces deux échelles de temps permet d'avoir une plus grande cohérence dans le concept de résilience. Ce travail s'inscrit plutôt dans une vision de la résilience du réseau électrique à court terme.

La résilience des réseaux (et en particulier du réseau électrique) est donc un objectif à atteindre pour chaque catastrophe climatique. Elle fait donc l'objet d'un traitement différent suivant la nature de l'aléa. L'exemple de la résilience du réseau électrique face aux inondations en est un bon exemple.

C. Le cas de l'inondation

Tout d'abord, « on définit par inondation la submersion d'espaces terrestres par les eaux douces ou salées. Cette submersion peut être plus ou moins longue et peut concerner un espace plus ou moins vaste, fonction de la quantité d'eau, de la cinétique de l'événement et de la topographie du terrain »(Veyret et Laganier, 2017). Elle peut par exemple être causée par de fortes pluies, par la fonte des neiges ou encore par la rupture d'une installation hydroélectrique (Veyret et Laganier, 2017).

D'un point de vue universitaire, la gestion du risque inondation est source d'une documentation riche. Dans le secteur de la recherche, on peut facilement trouver des travaux de thèses consacrés à ce sujet. Par exemple, des « modélisations d'indicateurs de résilience urbaine face au risque d'inondation »(Heinzle, 2019b) existent et de nombreux ouvrages sur la résilience des réseaux

techniques urbains face au risque inondation sont accessibles directement en ligne (Serre, 2015) (Serre, 2016a).

Concernant l'aspect réglementaire, l'inondation est l'objet d'un plan particulier : le Plan de Prévention des Risques Inondation (PPRI). Dans ce plan, les services d'état se chargent d'élaborer une cartographie précise du zonage du risque inondation. Après lecture de deux exemples de PPRI (celui du Val de Tours Val de Luynes et celui de Nantes), nous avons pu voir que les réseaux électriques sont l'objet d'un certain nombre de points. Rapidement, ces documents apportent des prescriptions concernant la conception et l'organisation des réseaux électriques se trouvant en zone inondable. Ce sont pour la plupart des consignes générales qui sont destinées aux réseaux électriques à l'intérieur des bâtiments et non au réseau de distribution (cf partie I.C.1) (Préfecture de Loire-Atlantique, 2014). Néanmoins, nous avons pu voir que les réseaux électriques bénéficient tout de même d'une considération particulière vis-à-vis de l'inondation.

En clair, la gestion du risque inondation du point de vue des réseaux électriques demeurent imparfaite mais bénéficie d'une large documentation dans des domaines comme la recherche ou au sein des institutions publiques. C'est dans ce sens qu'Enedis a souhaité adapter le sujet initial (qui traitait du risque inondation) au risque incendie. En effet ils ont assuré disposer, d'ores et déjà, d'outils cartographiques représentant le risque de chaque tronçon face aux inondations. Cette question est traitée par les équipes de géomaticiens pour leur permettre ensuite d'évaluer la résilience de leur réseau en imaginant des scénarios de coupures.

Au contraire, le risque incendie fait selon eux l'objet d'un vide concernant les éventuels impacts possibles sur le réseau électrique. Ils n'ont que peu d'outils d'analyse et l'orientation de ce travail vers cette problématique se révèle être une opportunité de s'intéresser à quelque chose qu'ils rencontrent déjà sur certains secteurs de leur réseau.

I. Les réseaux électriques face au risque incendie

D'après Géoconfluences, « Le risque peut être défini comme la probabilité d'occurrence de dommage compte tenu des interactions entre facteurs d'endommagement (aléas) et facteurs de vulnérabilité (peuplement, répartition des biens). On peut ainsi résumer cette définition par une formule : « **risque = aléa × vulnérabilité** »(Géoconfluences, 2022a).

Cette partie aura donc pour objectif de définir concrètement ce que nous allons considérer comme le risque, l'aléa et la vulnérabilité au travers d'une définition précise des dimensions majeures qui entourent ce sujet.

A. Le risque incendie

Le risque incendie est déjà un phénomène largement répandu en France. On estime que 6669 communes sont exposées à ce risque dont 75% dans la moitié sud de la France (CEREMA, 2018). Plusieurs facteurs naturels expliquent ce risque et son intensité. On retrouve :

- La masse de combustible et son inflammabilité
- La météorologie (plus ou moins de sécheresse et de vent)
- La topographie et la nature des sols

De surcroît, il faut ajouter à ces facteurs les effets de certaines actions humaines. En effet « la progression de la pression urbaine », « le développement de l'habitat à l'interface des forêts », « le non-respect des Obligations Légales de Débroussaillage », et d'autres comportements anthropiques sont également la source du risque incendie (CEREMA, 2018).

D'un point de vue scientifique, l'incendie est « une réaction chimique d'oxydation d'un combustible par un comburant et une source d'énergie pour le déclencher » (Chanti, 2017). Pour représenter ce phénomène on utilise souvent le triangle du feu.



Figure 4 : Triangle du feu – blog Extincteur

Rapidement, ici on parle d'énergie pour la chaleur qui est une température suffisamment élevée pour qu'il y ait combustion. Elle provient d'une source de chaleur (étincelle, allumette, cigarette, etc...). Le combustible est un matériau inflammable qui peut être un gaz, un liquide ou un solide. Enfin, le comburant est principalement le dioxygène contenu dans l'air (Chanti, 2017). L'intérêt de cette représentation en triangle est de bien illustrer le fait que s'il manque un des trois « cotés » du triangle le feu cesse (Niandou et Sauce, 2009).

On identifie six causes principales pouvant être à l'origine d'un départ de feu :

- Thermique : source chaude
- Electrique : anomalie dans le réseau
- Electrostatique : électricité statique
- Mécanique : choc, friction ou abrasion
- Climatique : soleil, foudre, ...

- Chimique
(Chanti, 2017)

Dans le cadre de ce travail, nous travaillons sur la gestion du réseau électrique face au risque incendie. Néanmoins, nous allons distinguer deux types d'incendies.

1. L'incendie dit « interne »

Premièrement, nous distinguons l'incendie « interne » au réseau. Il s'agit d'un incendie électrique déclenché par une anomalie du réseau. Il existe plusieurs causes à ce type d'incendie :

- Les arcs électriques se forment à la manière de la foudre par amorçage de l'air. Ils peuvent alors toucher des matériaux inflammables (EDF, 2020).
- Les courts-circuits surviennent lors d'une augmentation brutale de l'intensité et viennent chauffer les câbles (EDF, 2020).
- Les défauts d'isolement qui entraînent un vieillissement prématuré des fils et des équipements (EDF, 2020).
- Les surcharges électriques qui peuvent intervenir lorsqu'un disjoncteur alimente un trop grand nombre d'appareils de consommation (EDF, 2020).

2. L'incendie externe

Par ce terme, nous regroupons les incendies provenant de l'extérieur du réseau électrique.

Dans l'exercice de modélisation qui suit (cf II), nous choisirons de considérer seulement des incendies que nous appelons « externes ». Par soucis de simplification, nous prendrons en compte les incendies appelés feu de forêt qui sont répertoriés précisément et dont les données sont disponibles en open source.

Parmi ces feux de forêt, on en distingue plusieurs types :

- Les feux de sol brûlent la matière organique de la litière, les tourbières et l'humus. Leur vitesse de propagation est faible (Ministère de la transition écologique, 2022a).
- Les feux de surface brûlent la partie basse de la végétation. Leur propagation est dite « par rayonnement » et sont plutôt présents dans la garrigue et les landes (Ministère de la transition écologique, 2022a).
- Les feux de cimes brûlent la partie haute des arbres pour former une couronne de feu. Le feu progresse en mur de flamme qui s'élève de la couche de surface jusqu'au-dessus de la cime des arbres. Ils se propagent très vite et sont difficiles à contrôler (Ministère de la transition écologique, 2022a).

De ces trois types de feux, les feux de cimes sont les plus destructeurs pour les installations électriques en surface. Au contraire, on peut imaginer que les feux de sols peuvent toucher des installations électriques enfouies. De plus, ces feux sont souvent présents en simultané lors d'un incendie. Ainsi, il est probable que la totalité du réseau électrique soit exposé aux feux de forêts (Gouvernement de l'Ontario, 2022).

B. Aléa incendie

Il existe de nombreuses méthodes pour définir l'aléa incendie. Par exemple, on peut « tenir compte des données climatiques (températures, pluviométrie, vent, foudre, etc.), du relief et des statistiques sur les feux (localisation, surface, etc.) » (DREAL, 2021). L'aléa est souvent caractérisée par

la combustivité («quantité de chaleur produite suivant l'essence, sa densité et la vitesse de propagation») ou par l'inflammabilité (« facilité à prendre feu et à propager via les continuités horizontales et verticales »)(DREAL, 2021). Dans le cas de la région Centre – Val de Loire, le relief est très plat et il y a un manque de données fiables sur les feux. L'analyse de l'inflammabilité et de la combustivité nécessiterait d'importants relevés de terrain (DREAL, 2021).

Dans ce contexte, la caractérisation de l'aléa utilisé dans ce travail « est basée sur la sensibilité naturelle au feu des formations végétales qui tient compte de leur capacité d'inflammation et de combustion »(DREAL, 2021). Cette approche est jugée robuste et des comparaisons avec des études antérieures différentes ont déjà prouvé que les résultats obtenus sont fiables (DREAL, 2021).

La caractérisation de l'aléa s'appuie donc ce tableau de référence :

	Sensibilité au feu
Landes	Fort
Forêt de conifères	Fort
Forêt mélangée de conifères et feuillus	Moyen
Forêt de hêtre, châtaignier ou robinier	Moyen
Forêt d'autres feuillus	Faible
Forêt ouverte de conifères	Moyen
Forêt ouverte mélangée de conifères et feuillus	Faible
Forêt ouverte de feuillus	Faible

Figure 5 : Sensibilité au risque feux de forêt des formations végétales – Préfecture région Centre Val de Loire (Direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement)

Cet aléa a été déterminé à l'échelle de toute la région Centre – Val de Loire. En ce qui concerne notre commune d'étude de Chinon, l'aléa naturel se présente sous cette forme :

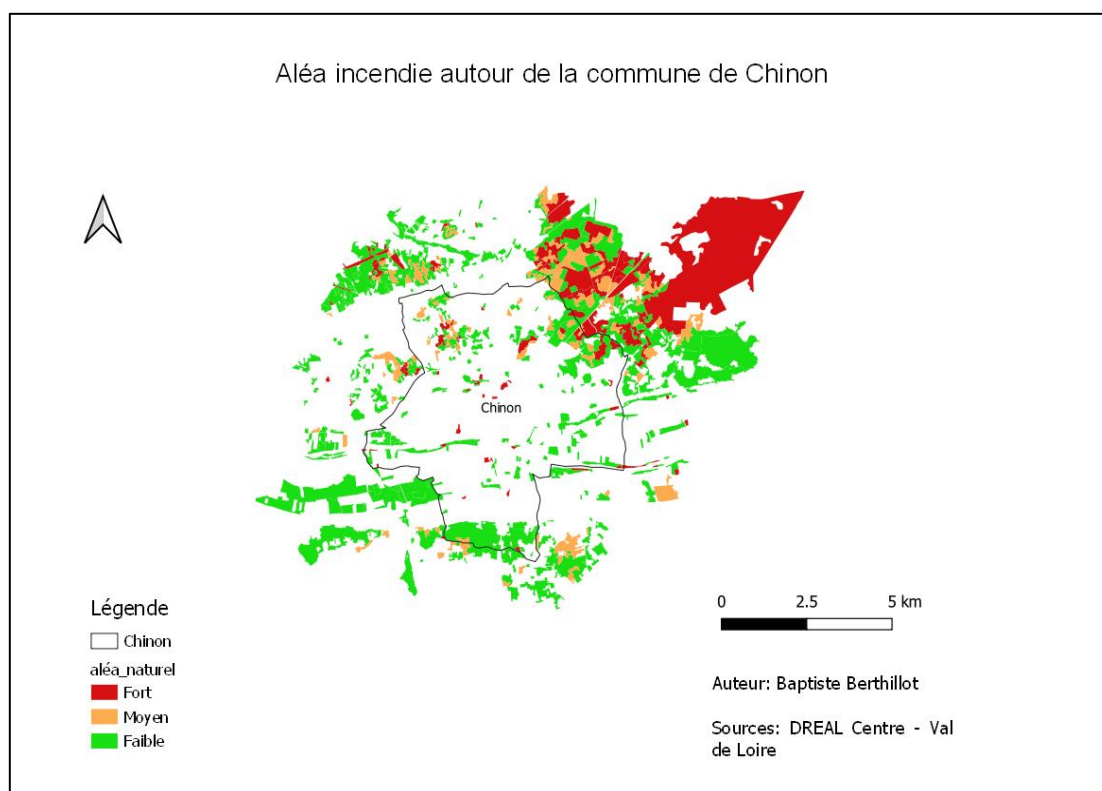


Figure 6 : Aléa incendie autour de la commune de Chinon – Baptiste Berthillot

Dans ce travail nous considérerons que l'aléa incendie est uniquement basé sur l'aléa naturel que nous venons de développer. En réalité, un certain nombre de facteurs anthropiques jouent un rôle très important dans le déclenchement des incendies. Des études ont pu démontrer que dans certaines zones en France entre 70% et 80% des incendies sont causés par des activités humaines (Ministère de la transition écologique, 2022a). On classe ces origines humaines en cinq catégories : les causes accidentelles (notamment les incendies causés par des anomalies électriques), l'imprudence (mégots, pique-nique...), les travaux agricoles, la malveillance, les loisirs, la déprise agricole et l'urbanisation (Ministère de la transition écologique, 2022a). L'ensemble de ces facteurs viennent aggraver les facteurs naturels et augmente l'aléa incendie (Ministère de la transition écologique, 2022a).

C. Vulnérabilité

La vulnérabilité est propre à un objet matériel. Dans notre cas, elle s'applique à notre objet d'étude : le réseau électrique. Nous allons donc le définir explicitement avant d'aborder la vulnérabilité à proprement parler.

1. Réseaux électriques : structure et enjeux

« Les réseaux électriques sont les infrastructures qui permettent d'acheminer l'énergie électrique des installations de production jusqu'aux installations de consommation » (Cosson, 2016). On divise le réseau électrique en quatre parties distinguées :

- a. La production
- b. Le réseau de transmission
- c. Le réseau de distribution
- d. La consommation

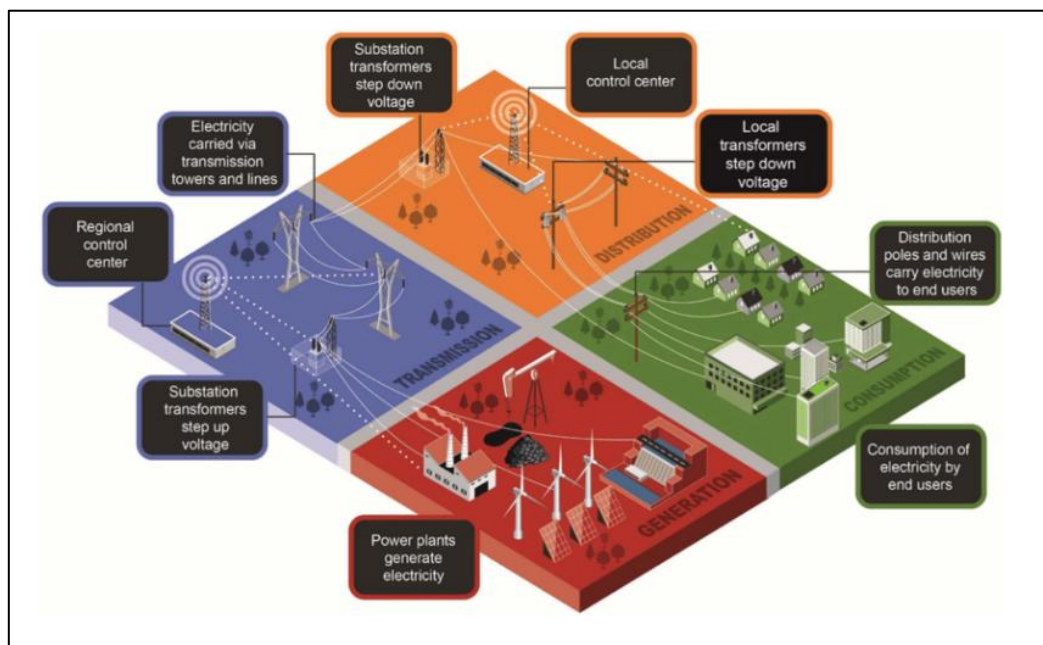


Figure 7 : Structure du réseau électrique – Carbone 4

a. La production

Historiquement, « la production de l'électricité est centralisée dans des sites de production dont les capacités s'échelonnent de quelques dizaines à plusieurs centaines de mégawatts (MW) » (Diop,

2018). L'électricité est produite à partir de deux types de sources d'énergie : les sources fossiles (charbon, fioul, gaz, uranium, etc...) et les sources renouvelables (vent, soleil, eau, biogaz, etc...). Les sources d'énergie fossile sont utilisées comme combustibles dans des centrales thermiques. Au contraire, les énergies renouvelables ont des principes de fonctionnement divers (l'eau et le vent entraînent une turbine et l'énergie du soleil est transformée en électricité par effet photovoltaïque) (Diop, 2018). Les centrales thermiques présentent l'avantage d'être plus ou moins pilotables au contraire de l'éolien ou du photovoltaïque par exemple qui sont non pilotables (on ne maîtrise pas quand il y aura du vent ou du soleil). Cette particularité rejoint une autre : l'électricité est difficilement stockable en grande quantité. Ainsi, l'équilibre entre la production et la consommation doit être maintenue en temps réel (on adapte la production à la demande) (Diop, 2018).

b. Le réseau de transmission (ou de transport)

Le réseau de transmission « achemine l'électricité produite, sur une très grande distance des sites de production aux postes sources du réseau de distribution »(Diop, 2018). Ce transport s'effectue en haute tension pour limiter les pertes par effet Joule. Sa capacité va de quelques dizaines à plusieurs centaines de mégawatts. Cette partie du réseau électrique est gérée par RTE qui est le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français. Par ailleurs, « pour des raisons de sécurité d'approvisionnement, le réseau de transport a une structure maillée »(Diop, 2018). Cela signifie que chaque nœud du réseau est alimenté par au moins deux lignes pour assurer la continuité de l'alimentation en cas de coupure d'une ligne (Diop, 2018).

c. Le réseau de distribution

Le réseau de distribution est la partie du réseau électrique que nous considérerons pour notre modélisation dans la suite de ce travail. Synthétiquement, il permet « l'alimentation des consommateurs finaux en basse tension sur l'ensemble du territoire »(Diop, 2018). Il est particulièrement dense en comparaison du réseau de transmission avec près d'un million de kilomètres de lignes contre un peu plus de 100 000 km pour la transmission (Diop, 2018). Il est exploité en basse (BT) ou en moyenne tension (HTA) et il est alimenté par les postes sources. Ces postes sources sont en fait des transformateurs qui permettent de passer d'un courant haute tension venant du réseau de transmission à de la moyenne tension pour le réseau de distribution (Diop, 2018). Le courant moyenne tension est ensuite directement utilisé par certains usagers ou envoyé vers des postes de distributions basse tension équipés de transformateurs moyenne vers basse tension pour le reste des autres usages. Afin d'éviter des problèmes de surtension, ces postes de distribution sont connectés au reste du réseau en étoile. En milieu urbain, ils peuvent alimenter près de 300 logements en électricité (Diop, 2018).

En France, le réseau de distribution est géré à 95% par Enedis. Les cinq autres pourcents sont gérés par des entreprises locales (par exemple Gérédis dans les Deux-Sèvres) (Cosson, 2016).

d. La consommation

Le réseau électrique a pour vocation d'alimenter en électricité la totalité des consommateurs. On retrouve principalement les clients résidentiels qui utilisent le réseau basse tension et les petites industries/PME qui font appel au réseau moyenne tension (Cosson, 2016).

Comme précisé dans le paragraphe du réseau de distribution, ce travail ne prendra pas en compte la partie production et le réseau de transmission. Seul le réseau de distribution sera utilisé. Les postes sources seront la source du courant électrique qui viendra alimenter toutes les consommations du réseau. Les postes de distribution qui assurent le passage de la moyenne tension à la basse tension ne seront pas non plus pris en compte pour simplifier la modélisation.

2. Vulnérabilité face aux incendies

Selon le site Géoconfluences, la vulnérabilité « exprime le niveau d'effet prévisible d'un phénomène naturel (un aléa) sur des enjeux (les sociétés humaines et leurs activités) ». Cette évaluation cherche en fait à quantifier ce qui est perdu à cause des effets d'un aléa. L'impact du dommage dépend de différents critères : la « sensibilité au dommage », le « degré de dépendance », « la transférabilité » ou encore « la résilience » (Géoconfluences, 2021).

Le réseau électrique représente un gros enjeu au regard de l'interdépendance dont il est sujet avec d'autres réseaux de distribution (transports et télécommunications par exemple) (Localtis, 2022). L'évaluation du niveau de risque auquel il est exposé pour divers aléas est donc important. L'aléa incendie en fait partie et c'est dans ce sens que ce travail a lieu.

Le réseau électrique est exposé à l'aléa incendie dans certaines régions françaises. Dans notre modélisation, nous n'allons pas chercher à évaluer la vulnérabilité du réseau électrique à un incendie en fonction d'une grande quantité de facteurs. Néanmoins un réseau électrique est plus ou moins vulnérable à l'aléa incendie en fonction de divers critères. Par exemple, il existe des points de sensibilité sur lesquels le feu peut être particulièrement destructeur. Face aux feux de forêt, les réseaux électriques sont très sensibles au niveau des transformateurs, des postes électriques (disjoncteurs, sectionneurs, ...) et des équipements électroniques/télécoms. Dans une moindre mesure, les lignes électriques peuvent également être touchées par la chaleur, la fumée ou les cendres (Carbone 4, 2021). On peut donc en déduire qu'au niveau de toutes les installations citées, la vulnérabilité du réseau est importante. Au contraire, nous pouvons en déduire que le réseau est moins vulnérable aux incendies en d'autres points (tronçons enterrés) (Carbone 4, 2021).

La vulnérabilité du réseau électrique face aux incendies de forêt n'est que peu développée dans les travaux réalisés à ce sujet. Comme c'est le cas pour les inondations, elle mérite une évaluation précise qui tient compte des points de sensibilité que l'on a pu aborder ci-dessus. Dans notre modélisation, nous nous baserons sur une évaluation simplifiée que l'on développera en partie II de ce rapport.

D. Etat de l'art des dispositions actuelles

La gestion du risque incendie sur les réseaux électriques n'est encore que trop peu développée dans les domaines scientifiques et opérationnels. Le sujet de ce travail s'inscrit justement en réponse à ce constat. Cependant, il est intéressant de voir comment est abordé ce problème dans le cadre réglementaire. Nous allons donc réaliser un tour d'horizon des dispositions actuelles à ce sujet que l'on peut retrouver sur les documents délivrés par plusieurs autorités compétentes.

D'un point de vue général, « face au risque feu de forêt, l'Etat et les collectivités territoriales ont un rôle de prévention [...], une politique d'entretien et de gestion des espaces forestiers [...] ainsi que la réalisation de plans de prévention des risques naturels (PPR) pour les communes les plus menacées » (Ministère de la transition écologique, 2022a).

1. En amont

a. Prévention

La prévention débute avec un travail de prévision. Elle consiste à observer les paramètres qui peuvent conduire à une formation d'incendies. On retrouve comme paramètre les conditions météorologiques ou encore l'état de la végétation. Cette surveillance permet de détecter au plus tôt tout départ de feu pour intervenir le plus rapidement possible (Ministère de la transition écologique, 2022a).

La prévention à proprement parler est plutôt du ressort des collectivités locales et à destination des particuliers. Un certain nombre de plans permettent de documenter le risque incendie pour toute personne souhaitant s'informer. Le document principal qui traite des incendies est le PPR qui contient un volet incendie (ou parfois un PPRIF à part entière avec « IF » pour Incendie de Forêt). Dans ce type de règlement, des règles d'utilisation des sols sont précisées. On a par exemple :

- L'interdiction de construire dans les espaces d'aléa fort
- La définition de règles de constructions pour limiter la vulnérabilité
- La définition de mesures pour l'adaptation du bâti existant
- La définition des « mesures générales de prévention, de protection et de sauvegarde à la charge des collectivités et particuliers »

(Direction Départementale des Risques Majeurs, 2021)

On a aussi des documents spécifiques sur la défense des forêts contre l'incendie (par exemple des Plans Départementaux de Protection des Forêts contre les Incendies (PDPFCI) pour les départements les plus exposés (Préfecture du Gard, 2021)). On retrouve également des dispositions relatives au risque incendie dans le code forestier. Enfin, à l'échelle des intercommunalités, des plans de débroussaillage et d'aménagement forestier sont disponibles pour planifier l'aménagement des forêts (Ministère de la transition écologique, 2022a). La responsabilité individuelle est également intégrée à la lutte contre les incendies au travers de sensibilisation des populations (campagne publicitaire, etc...).

b. La prise en compte dans l'aménagement

A travers une adaptation de l'aménagement du territoire, on a la volonté de réduire l'aléa et la vulnérabilité. Les documents d'urbanisme comme les PLU ou les plans de prévention permettent de régir les utilisations et exploitations des sols dans des zones soumises à l'aléa incendie (Ministère de la transition écologique, 2022a). Cette politique d'aménagement peut prendre diverses formes : piste d'accès pompiers, points d'eau, pare-feu, débroussaillage organisé... Dans les plans de prévention, on intègre parfois la création de « coupures de combustibles, de zones tampon ou de coupe-feu qui permettent de cloisonner les massifs et de réduire le risque de propagation du feu » (Direction Départementale des Risques Majeurs, 2021). Des mesures post-incendie existent également. Par exemple, un reboisement rapide pour limiter l'érosion des sols après un incendie est souvent mis en place. L'utilisation d'espèces d'arbres moins combustibles ou le pastoralisme (type d'élevage agricole) sont encore d'autres stratégies mises en place pour limiter le nombre et l'intensité des incendies.

Ces exemples de mesures varient d'une région à une autre. Dans le cas de l'Indre-et-Loire, des travaux de protection sont clairement définis par la direction départementale des risques majeurs. On retrouve des obligations de débroussaillage pour les terrains à proximité de massifs forestiers où les rayons de débroussaillages sont précisés. Des distances de 50 mètres autour de son habitation et de 10 mètres autour des voies d'accès sont considérées comme suffisantes (Direction Départementale des Risques Majeurs, 2021). Les associations syndicales autorisées de défense de la forêt contre l'incendie rassemblent les propriétaires de parcelles forestières pour organiser la création de pistes empierrées et leur numérotation pour favoriser l'accès aux pompiers (Direction Départementale des Risques Majeurs, 2021).

c. En aval

Lors d'un incendie, l'organisation des secours fait l'objet de différents protocoles. En Indre-et-Loire, on distingue trois échelles différentes.

- Au niveau individuel

A l'échelle de l'individu, des mesures de protection existent pour assurer la sécurité des populations. Comme dispositif connu, on peut citer la fermeture automatique des portes coupe-feu présentes dans tout bâtiment recevant du public (Direction Départementale des Risques Majeurs, 2021).

Un Plan Familial de Mise en Sureté (PFMS) a pour but d'organiser la défense des populations et leur évacuation. On y définit des itinéraires d'évacuation, des points de rassemblement, des lieux d'hébergement et la liste des objets à mettre à l'abri. Par ailleurs, des kits d'urgence sont parfois distribués. Ils comprennent une radio, une lampe de poche, de l'eau, des médicaments, etc... (Direction Départementale des Risques Majeurs, 2021).

- Au niveau communal

A l'échelle de sa commune, le maire est chargé de dresser un Plan Communal de Sauvegarde où il planifie la gestion de situation d'urgence (et donc des incendies). Lorsque l'incendie dépasse ses capacités de gestion, le maire fait appel au préfet et aux moyens départementaux (Direction Départementale des Risques Majeurs, 2021).

Les établissements scolaires sont aussi le lieu de dispositifs particuliers pour l'évacuation des élèves et du corps enseignant (Direction Départementale des Risques Majeurs, 2021).

Dans certains départements, des corps communaux ou intercommunaux de sapeurs-pompiers sont amenés à réaliser des interventions de lutte contre les incendies (Sapeurs Pompiers de France, 2022).

- Au niveau départemental

Dans le cas des plus gros incendies, les moyens départementaux sont sollicités. Le préfet possède un dispositif ORSEC qui « permet la mobilisation des moyens publics et privés nécessaires à l'intervention » (Direction Départementale des Risques Majeurs, 2021). On retrouve sous son autorité le SDIS (Service Départemental d'Incendie et de Secours) dont les brigades de sapeurs-pompiers réalisent l'essentiel des missions de lutte contre le feu. Ils sont parfois complétés par des services communaux (vus au niveau communal) et des unités militaires (sapeurs-pompiers de Paris ou marins-pompiers de Marseille) (Sapeurs-Pompiers de France, 2022). Si l'ampleur de l'incendie dépasse les capacités d'intervention des moyens départementaux, le préfet peut faire appel aux moyens nationaux par l'intermédiaire du préfet de la zone de défense.

Pour la lutte incendie, les sapeurs-pompiers « disposent de moyens terrestres (véhicules d'intervention adaptés) qui peuvent être complétés par des moyens aériens (avions ou hélicoptères bombardiers d'eau) » (Direction Départementale des Risques Majeurs, 2021).

Au travers des étapes amont et aval de la gestion d'un incendie, on peut donc voir que cette question est une réelle préoccupation pour les pouvoirs publics. Ces dispositifs visent à réduire l'aléa, la vulnérabilité et les conséquences qu'un incendie peut avoir. Néanmoins, aucune mesure concernant les réseaux électriques n'a été trouvée dans le cadre de ce travail. Il est parfaitement possible qu'il en existe dans des documents non consultés. Cependant, la relative exhaustivité des lectures effectuées en la matière nous permet d'affirmer que cette question n'est pas assez traitée dans les différents plans et règlements existants. Cet état de l'art nous permet de confirmer l'intérêt de ce travail et de l'exercice de modélisation réalisé.

E. Application concrète/situation en France

1. A l'échelle nationale

La France possède la quatrième plus grande superficie de forêt en Europe avec près de 16.9 millions d'hectares. Le risque incendie est donc bel et bien présent sur le territoire national (Ministère de la transition écologique, 2022b). Selon l'Etat, sur les années 2018 et 2019, ce sont les régions du Sud-Ouest et du Sud-Est qui ont subies les plus gros dommages à cause d'incendies. Ces régions sont plus chaudes que les autres (avec davantage de sécheresses en période estivale par exemple) et elles sont plus exposées au vent. Néanmoins, l'intégralité du territoire est exposée à ce risque comme l'illustrent des exemples récents en Corrèze ou en Sologne au printemps 2020 (Ministère de la transition écologique, 2022b).

La carte ci-dessous illustre la répartition de ce risque à l'échelle du territoire métropolitain français.

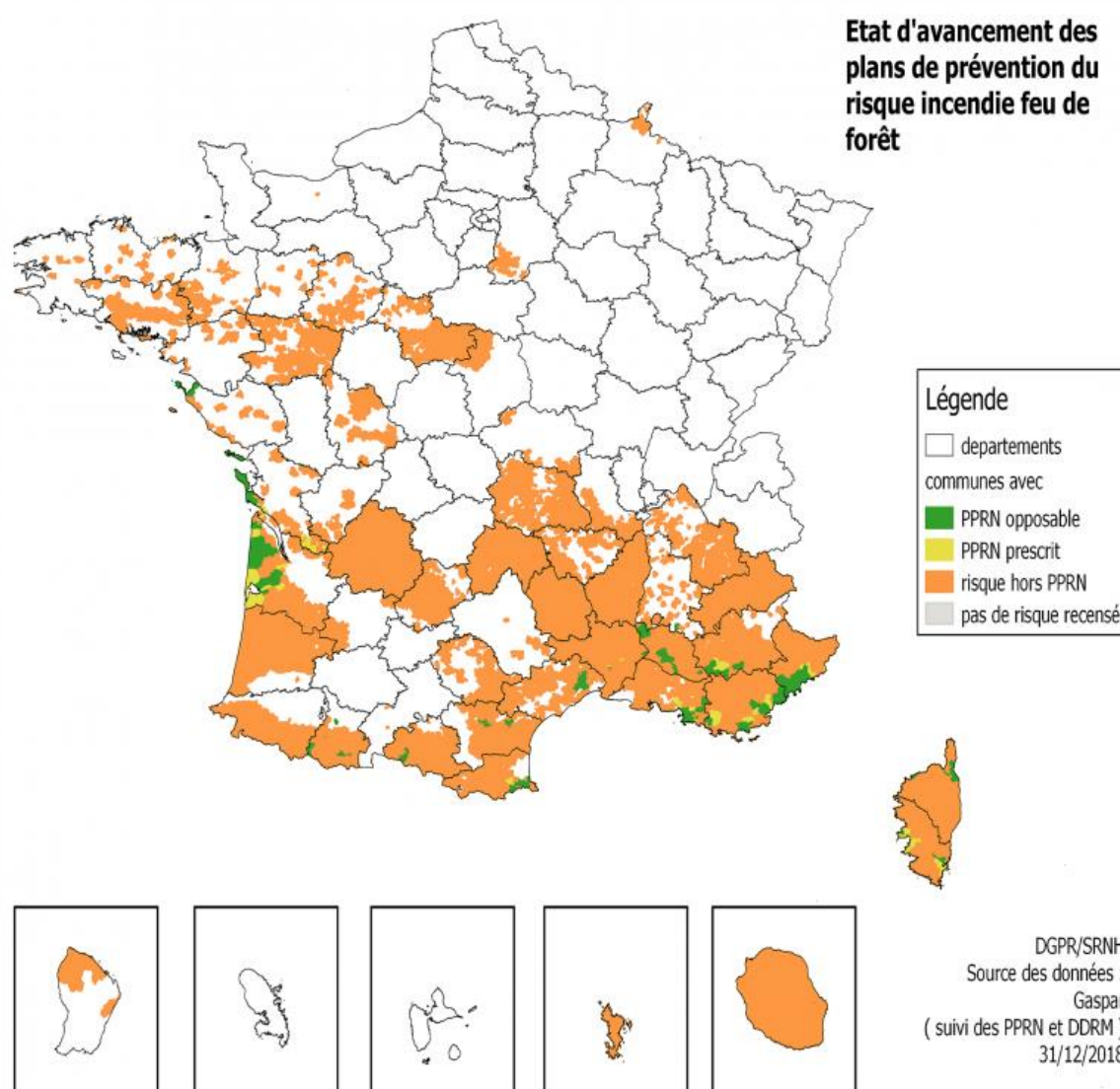


Figure 8 : Etat d'avancement des plans de prévention du risque incendie feu de forêt – Ministère de la transition écologique

2. A l'échelle de l'Indre-et-Loire

Comme nous pouvons le constater, le département d'Indre-et-Loire n'a qu'en moyenne pas plus de 10 feux de forêts par an. Néanmoins, chacune des forêts du département a fait l'objet d'un classement de son exposition au risque incendie. Ainsi, l'Indre-et-Loire dénombre 16 massifs boisés qui ont un risque élevé d'incendie et qui couvrent près de 60 communes différentes (Préfecture d'Indre-et-Loire, 2013).

Dans son rapport d'activité annuel datant de 2020, le Service Départemental d'Incendie et de Secours (SDIS) de l'Indre-et-Loire comptabilise 22 interventions pour feux de forêts dont 21 dites « marquantes ». Il déplore également 450 hectares de végétations brûlés à cause des feux de forêts (SDIS 37, 2019).

Au travers de cette partie, nous avons pu définir ce que représente matériellement l'ensemble des dimensions de notre sujet. La question du risque incendie est un problème très concret déjà traité en partie par différents documents officiels que nous avons pu analyser. Son application au réseau électrique demeure encore peu évoquée. Du fait de la nature et de l'importance qu'ont les réseaux électriques, ils devraient néanmoins bénéficier de dispositifs préventifs face aux incendies. L'Indre-et-Loire est touchée par des incendies de forêt et la commune de Chinon est répertoriée dans l'inventaire des massifs à risque élevé. Son réseau électrique peut donc être menacé par un feu de forêt.

C'est donc dans ce contexte que s'inscrit la modélisation qui va suivre.

II. Exercice de modélisation

Dans le cadre de ce travail autour de la gestion du risque incendie sur les réseaux électriques, il a été jugé utile de réaliser un plan du risque incendie au sein du réseau électrique. Ce plan portera sur la commune de Chinon (choisie arbitrairement en concertation avec mes tuteurs et Enedis).

A. Rappels

Comme nous avons pu le voir dans la partie précédente de ce rapport, le risque résulte de la combinaison d'un aléa et de la vulnérabilité. Mathématiquement on le traduit par un produit (Géoconfluences, 2022b) :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Vulnérabilité}$$

B. Définitions et application de la méthode

1. L'aléa

Nous avons défini les contours de l'aléa incendie en partie I de ce rapport. Nous allons donc nous appuyer sur le zonage de l'aléa incendie d'Indre-et-Loire qui considère uniquement la sensibilité de la végétation (aucun effet anthropique n'est considéré). Pour nous restreindre à Chinon, nous avons préalablement découpé cet aléa autour de la commune. Cette découpe s'est portée sur une plus grande surface que les limites de la commune pour intégrer les aléas avoisinants (qui peuvent être finalement plus proches que les aléas dans la commune mais plus éloignés).

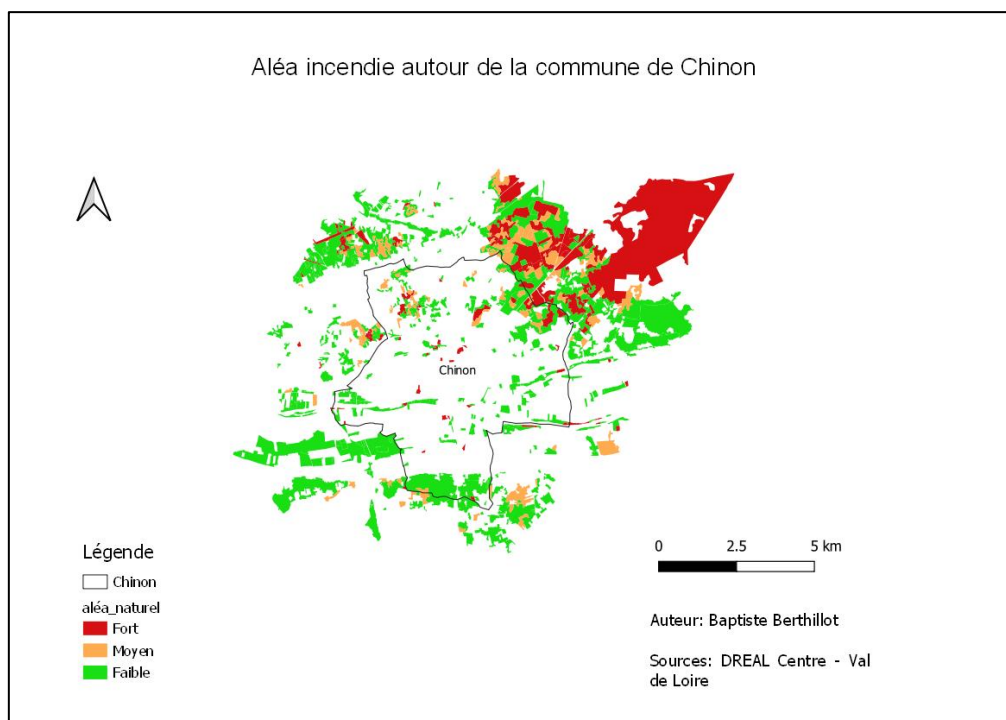


Figure 9 : Aléa incendie autour de la commune de Chinon – Baptiste Berthillot

a. Le réseau électrique

Le réseau électrique que nous considérons est donc celui de distribution qui est géré par Enedis dans notre cas. Il est disponible en Open Source sur le site web de l'Agence Ore (association de service public

qui diffuse des datas du domaine de l'énergie en collaboration avec les différents acteurs de ce secteur (data.gouv, 2022)). Nous avons restreint notre réseau à celui présent sur la ville de Chinon.

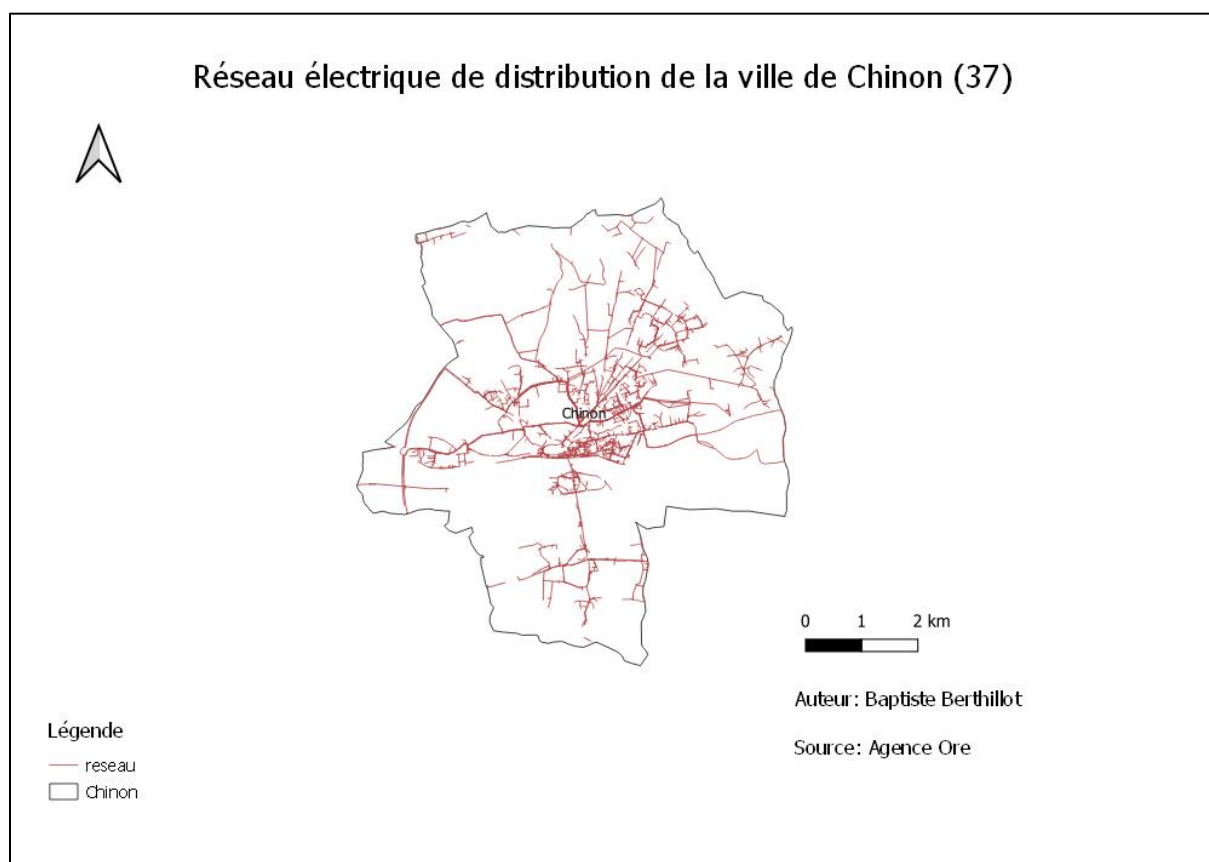


Figure 10 : Réseau électrique de distribution de la ville de Chinon – Baptiste Berthillot

2. La vulnérabilité du réseau

La vulnérabilité du réseau est ensuite déterminée selon une méthode précise. Elle fait partie intégrante de la modélisation et sera détaillée dans la suite de ce travail.

3. Outils utilisés pour cette modélisation

Pour mettre en place notre démarche calculatoire, nous avons pu utiliser divers outils. En premier lieu, nous nous sommes servis du logiciel de cartographie Qgis pour réaliser les manipulations de données cartographiques. Par exemple, les sélections du réseau électrique ou de l'aléa incendie ont été réalisées sous Qgis. Deuxièmement, l'ensemble des calculs ont été réalisés sur toaster integral. Ce logiciel développé sur Octave par M.Maïzia utilise le langage de programmation Matlab et permet de réaliser des algorigrammes (représentation en logigramme d'un algorithme). Toaster integral possède d'autres outils comme la possibilité d'importer directement des données cartographiques.

4. Description de la démarche

Cet exercice de modélisation a pour objectif final d'obtenir une carte du réseau électrique de Chinon où chaque ligne du réseau possède une valeur de risque. On peut ensuite la représenter avec par exemple, un dégradé de couleur suivant ce risque (du vert au rouge).

a. 1^{ère} étape : Modifications du réseau électrique

Si le réseau électrique est entièrement disponible en open source, quelques points se sont révélés problématiques pour notre exercice. Le premier concerne certains nœuds. Rappelons au préalable,

que le réseau est représenté sous forme d'arcs (qui sont les lignes du réseau) et de nœuds (qui sont les extrémités des lignes). Un nœud peut être commun à plusieurs lignes (qui sont alors reliées) ou bien lié à une seule ligne (ce qui veut dire que la ligne n'est pas reliée sur chacune de ses extrémités au reste du réseau, elle est donc une extrémité du réseau).

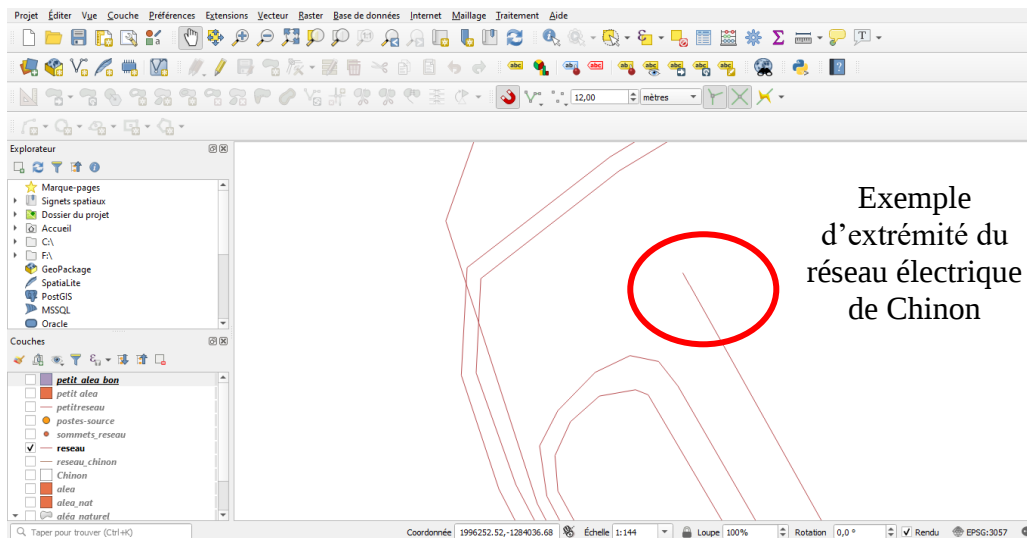


Figure 11 : Exemple d'extrémité du réseau électrique de Chinon – Baptiste Berthillot

La première modification du réseau a porté sur certains points particuliers du réseau. En effet, les postes de distributions basse tension (que nous avons évoqué en partie I.C.1) ne sont pas représentés dans ce réseau. On retrouve des lignes avec une de leurs extrémités très proches mais non fusionnées (voir schéma ci-contre).

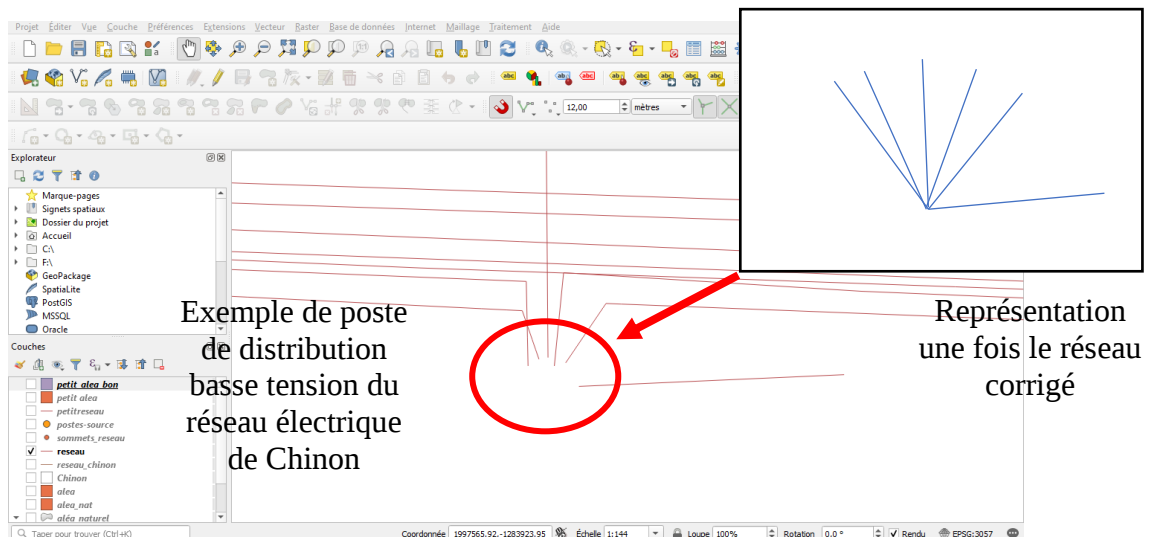


Figure 12 : Exemple d'un poste de distribution avant et après correction – Baptiste Berthillot

Nous avons donc fusionné l'ensemble de ces nœuds pour avoir une modélisation conforme à la réalité. En effet, dans la réalité, le courant parvient à ce poste de distribution au sein duquel on abaisse sa tension et il est redistribué vers les autres lignes connectées. Pour représenter cette circulation du courant électrique on doit donc fusionner ces points (voir encadré en haut à droite du schéma). Cette fusion est réalisée directement sous toaster (en matlab).

A partir du réseau électrique, on a également déterminé l'ensemble des points de destination de l'électricité. Nous avons choisi que chaque extrémité du réseau serait un point de consommation

d'électricité. Ces extrémités ont pu être repérées directement dans toaster et ont donc été utilisées comme points de destination du courant électrique. On en compte 497 différents.

A noter que pour les points d'origine, nous avons récupéré la localisation des postes sources pour la commune de Chinon (data.gouv, 2022). En l'occurrence, la commune de Chinon ne possède qu'un seul poste source (voir ci-dessous).

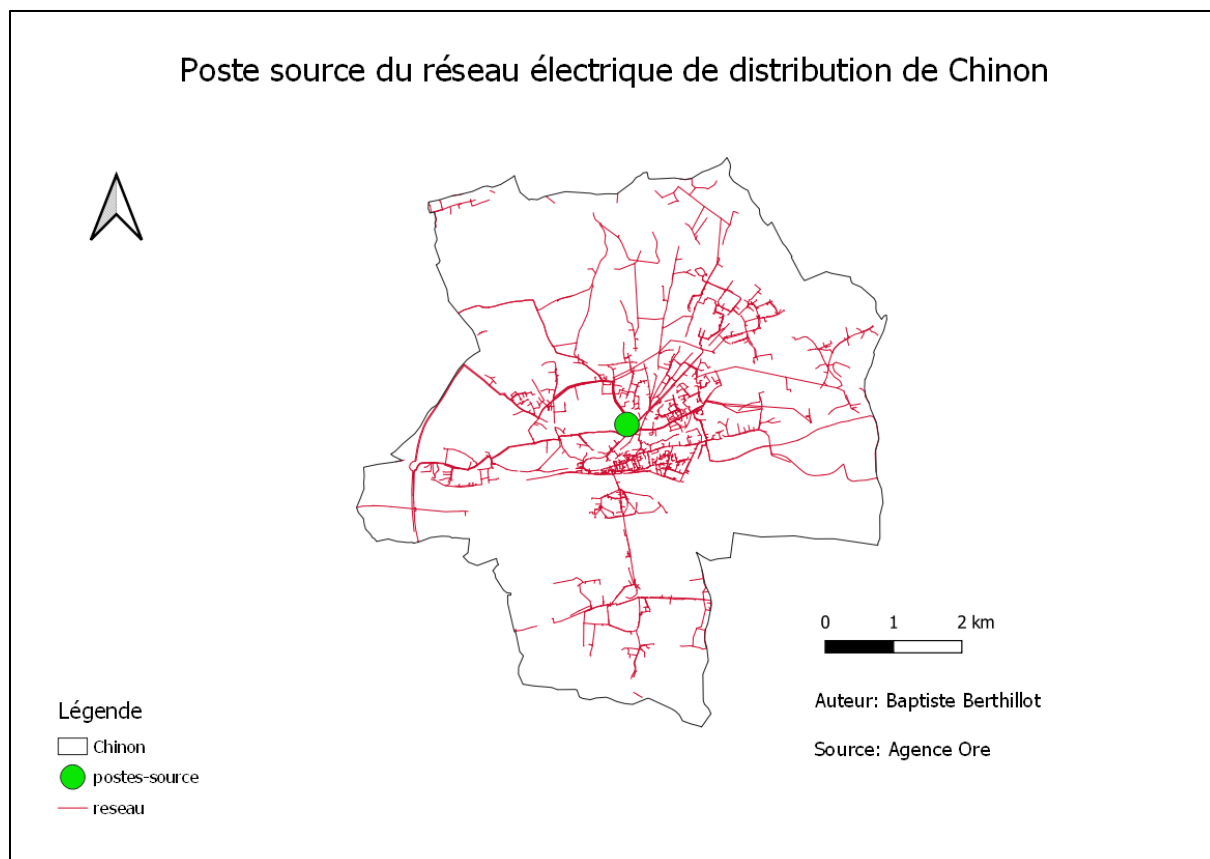


Figure 13 : Poste source du réseau électrique de Chinon – Baptiste Berthillot

b. 2^{ème} étape : Attribution d'une valeur d'aléa aux lignes du réseau

En vue du calcul du risque au sein du réseau électrique, nous avons attribué une valeur d'aléa pour chacune des lignes. Nous avons choisi de considérer que la ligne prend la valeur de l'aléa le plus proche. Pour mesurer la proximité d'une ligne et des aléas autour nous avons calculé la distance euclidienne des points particuliers de chaque ligne (ses deux extrémités) avec tous les points de tous les aléas. L'ensemble des lignes de notre réseau prennent donc les valeurs (1, 2 ou 3) suivant le degré de l'aléa le plus proche (Faible, Moyen ou Fort). La durée de calcul de cette étape a été de 6h44.

Par la suite, nous avons décidé d'ajouter un facteur à la valeur de l'aléa suivant la nature de la ligne. En effet, sur notre réseau électrique, les lignes sont soit souterraines soit aériennes. Nous avons décidé de multiplier la valeur d'aléa par 1.5 pour les lignes aériennes et par 0.5 pour les lignes souterraines. Ce facteur devrait faire l'objet d'une étude électrique plus précise mais permet de simuler une disparité d'exposition au feu au sein d'un même réseau électrique.

La totalité de cette étape a été réalisée sur toaster et a permis d'obtenir la carte ci-contre. L'aléa de chaque ligne prend des valeurs comprises entre 0.5 et 4.5.

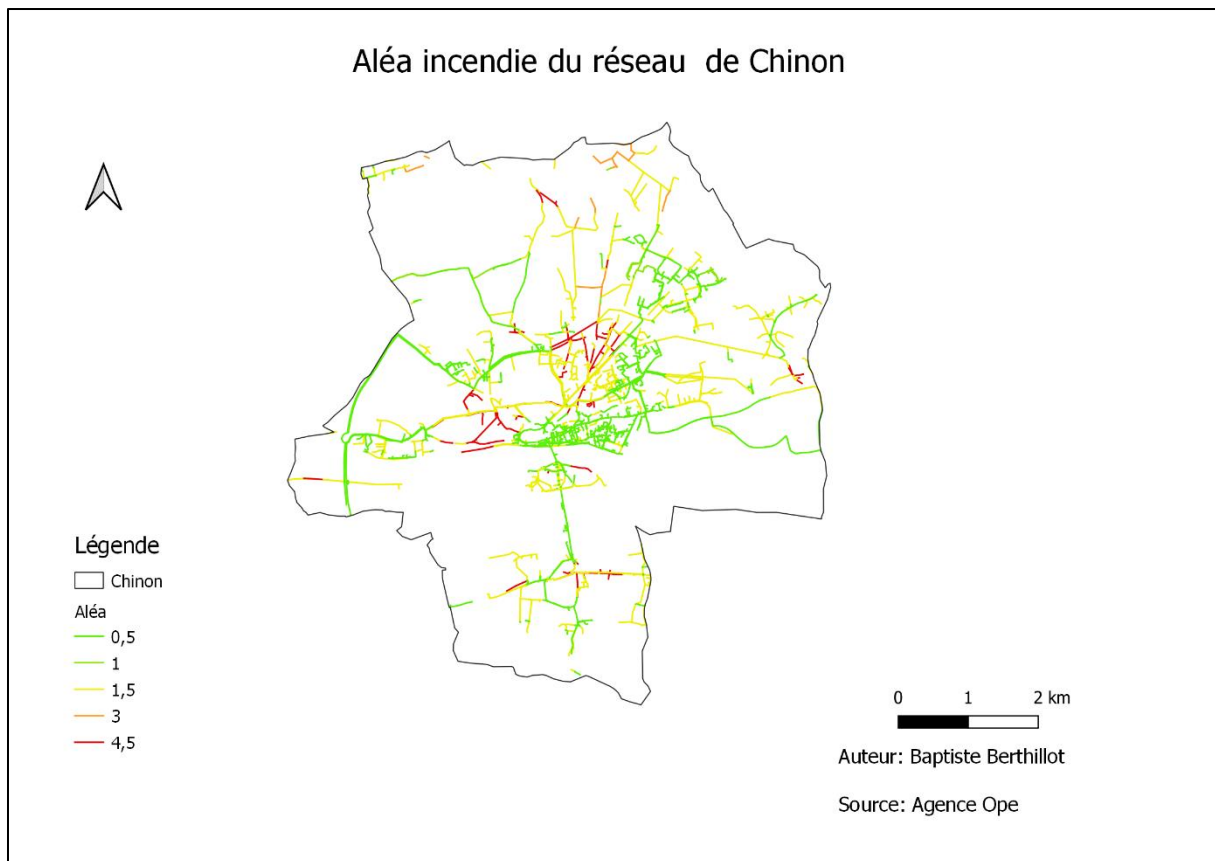


Figure 14 : Aléa incendie au sein du réseau électrique de Chinon – Baptiste Berthillot

c. 3^{ème} étape : Détermination de la vulnérabilité en fonction d'une demande

Comme pour l'aléa, on souhaite attribuer à chaque ligne du réseau une valeur de vulnérabilité. Cette valeur représente l'importance de chaque ligne. Pour l'exprimer numériquement, on simule la charge supportée par chaque ligne. Plus une ligne est empruntée par un courant électrique, plus on considère qu'elle sera importante pour le réseau. Pour une ligne très empruntée (et donc très vulnérable), en cas de coupure, le réseau souffrira d'importantes perturbations. Pour simuler des flux, nous avons choisi que la totalité du courant proviendrait du seul poste source de Chinon. Les extrémités du réseau (que nous avons repérées en amont) seront les points de consommations (où le courant doit parvenir). Ensuite, à l'aide de l'algorithme de Dijkstra, nous calculons l'itinéraire qu'empruntera le courant électrique entre le poste source et chaque point de destination. A partir de cet algorithme, nous repérons les lignes du réseau empruntées. Pour chacune d'entre elles nous lui ajoutons un à sa valeur précédente (*). Ainsi, nous obtenons le nombre de fois qu'a été emprunté chaque ligne dans le cadre de l'affectation d'un flux à partir du poste source vers l'ensemble des consommateurs. Par exemple, une ligne en sortie du poste source a de grandes chances d'avoir une charge importante (le courant électrique l'emprunte systématiquement quelque soit sa destination). A contrario, une ligne en fin d'arborescence aura probablement une charge faible puisque seul le flux allant vers le point de consommation à l'extrémité de cette branche de l'arborescence traversera cette ligne. Les autres flux ne dépendent pas de cette ligne (elle est donc moins importante aux yeux du réseau).

Ensuite, pour exprimer l'importance de chaque ligne aux yeux du réseau entier, on divise cette valeur par la valeur maximale prise sur le réseau.

On obtient la formule : $v_e = \text{charge}(v_e) / \max(\text{charge}(v_e))$

(*) : A noter que nos valeurs de flux sont toutes égales. Elles sont toutes de 1 et cela signifie que chaque consommateur bénéficie de la même importance (tous les flux sont équivalents).
 Au terme de cette étape, nous obtenons une valeur de vulnérabilité pour chacune des lignes du réseau.
 Cette vulnérabilité est directement visible grâce au plan du réseau ci-contre.

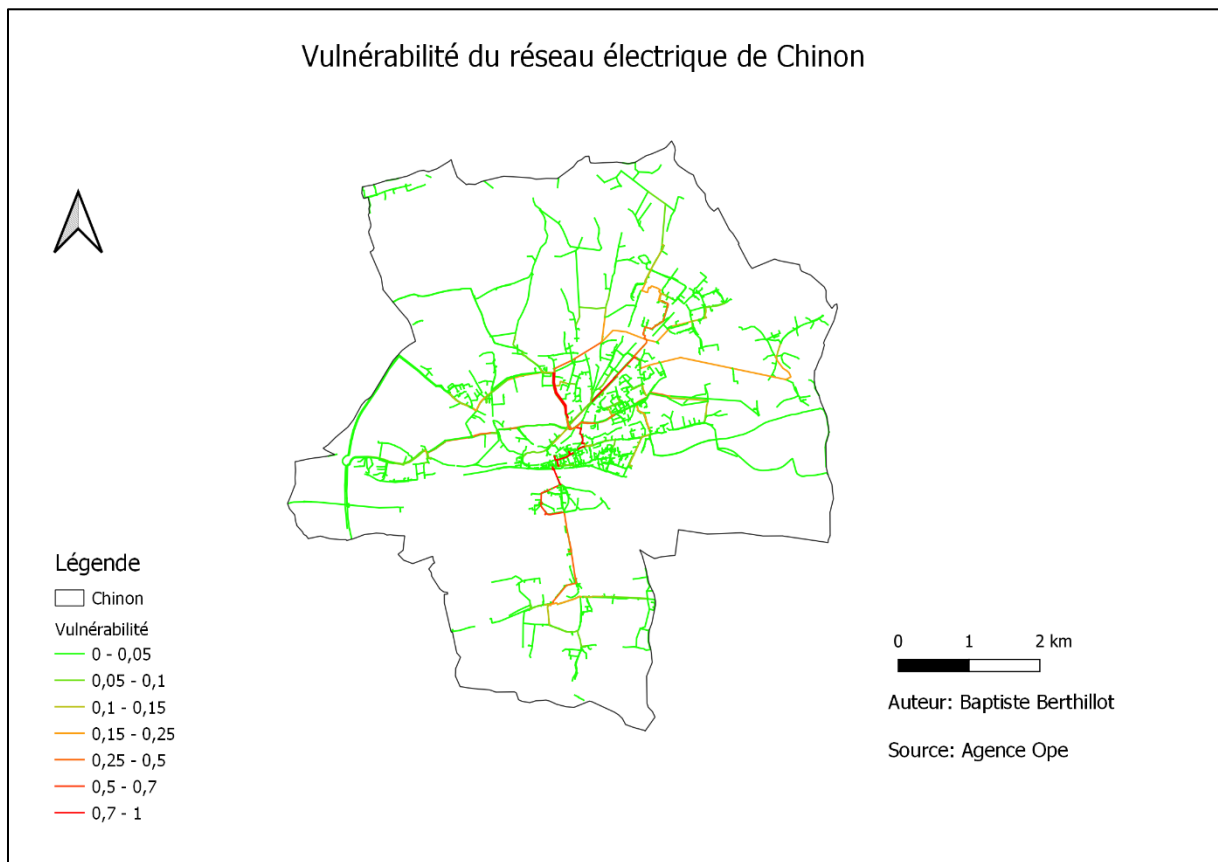


Figure 15 : Vulnérabilité du réseau électrique de Chinon – Baptiste Berthillot

d. 4^{ème} étape : Calcul du risque

La dernière étape de cette modélisation consiste à combiner les deux cartes obtenues ci-dessus. Par un produit entre l'aléa et la vulnérabilité, nous obtenons la carte du risque incendie du réseau électrique de la commune de Chinon.

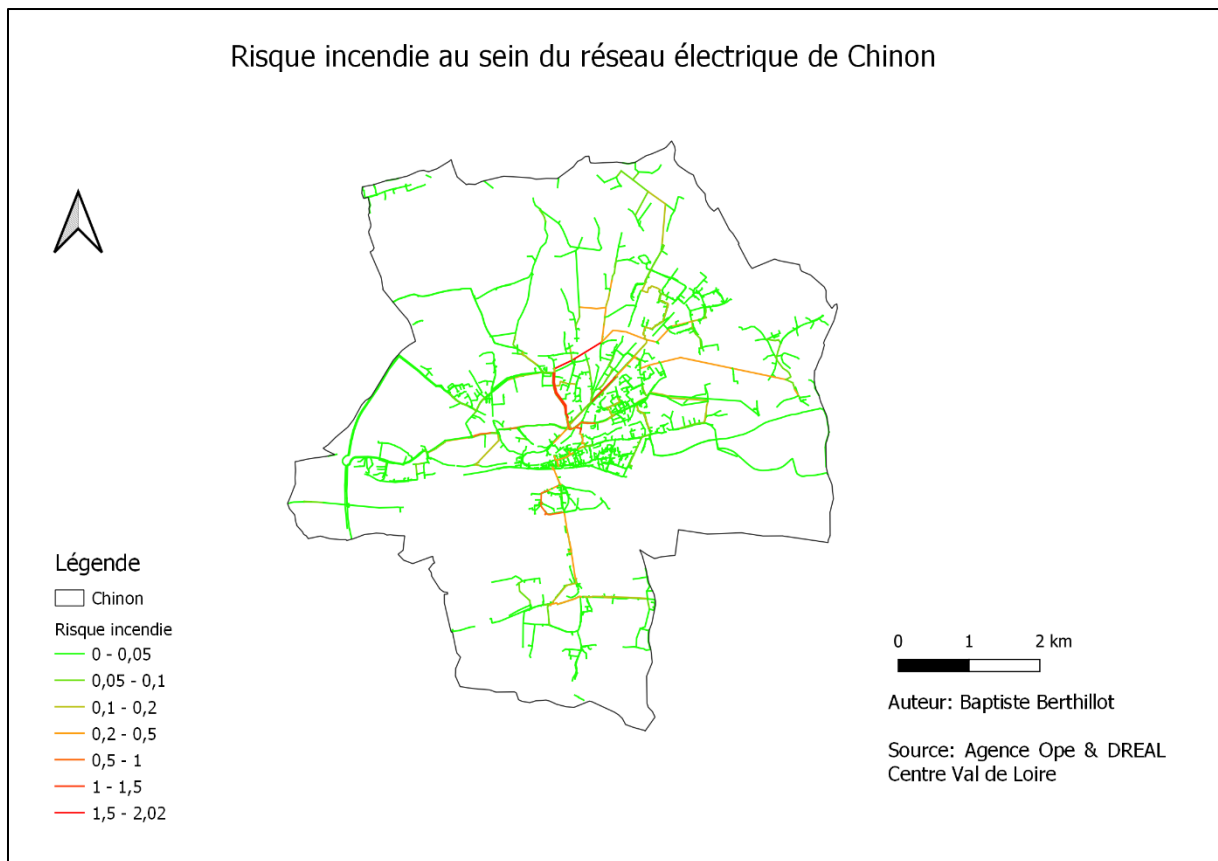


Figure 16 : Risque incendie du réseau électrique de Chinon – Baptiste Berthillot

5. Structure du calcul

Comme précisé précédemment, l'ensemble des calculs a été réalisé sur toaster et prennent la forme d'un algorithme.

Nous avons donc l'algorithme du calcul de l'aléa :

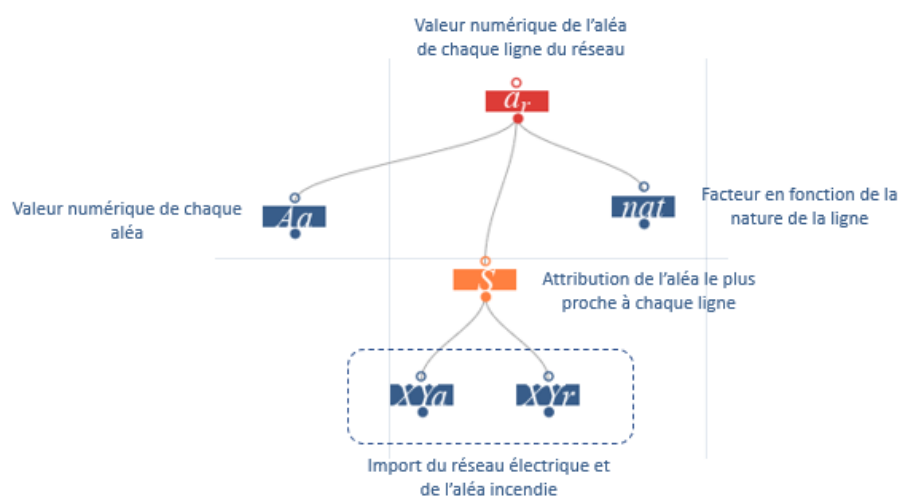


Figure 17 : Algorithme du calcul d'aléa – Baptiste Berthillot

Nous avons également celui de la vulnérabilité :

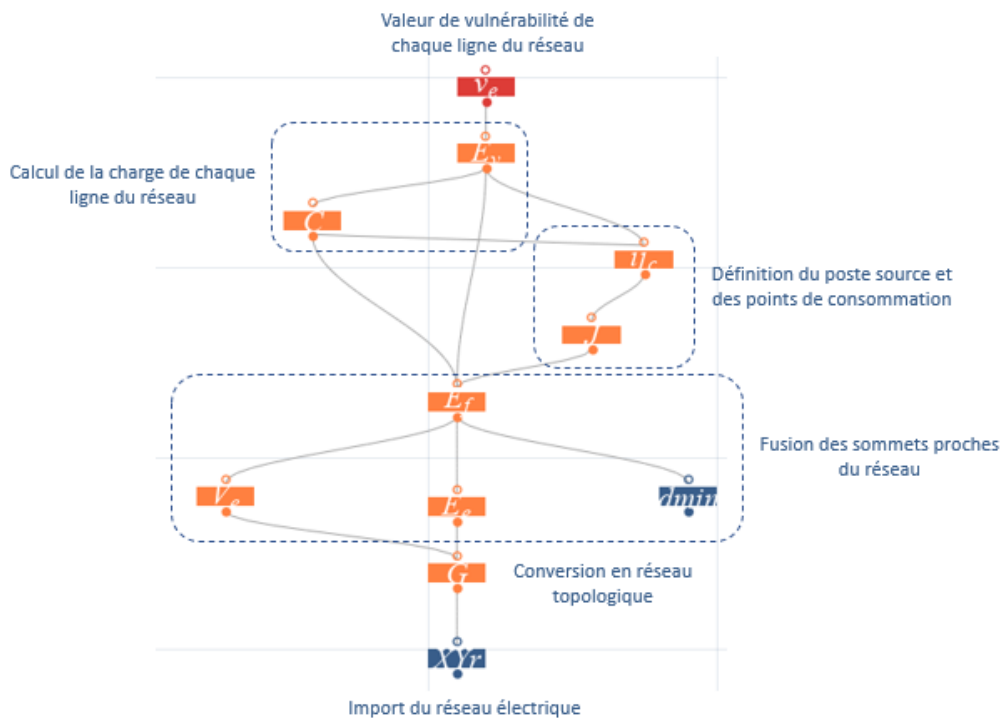


Figure 18 : Algorithme du calcul de vulnérabilité – Baptiste Berthillot

Enfin, en combinant les résultats de ces deux algorithmes, nous obtenons celui du risque :

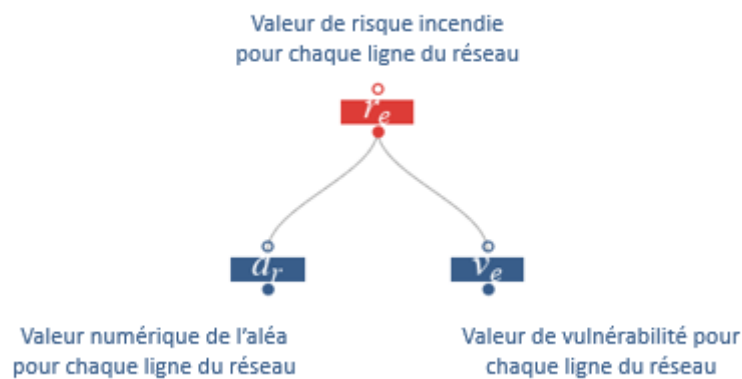


Figure 19 : Algorithme du calcul de risque – Baptiste Berthillot

6. Analyse des résultats

L'analyse des résultats peut s'effectuer en 3 étapes. En effet, seule la représentation cartographique nous permet de voir si nos résultats sont plausibles vis-à-vis des contours du problème initial. Les cartes nous permettent aussi d'interpréter les résultats.

Premièrement, pour l'aléa, nous pouvons superposer le zonage de l'aléa incendie, provenant de la DREAL Centre Val de Loire, avec notre réseau électrique avec chaque ligne prenant la couleur de l'intensité de l'aléa le plus proche.

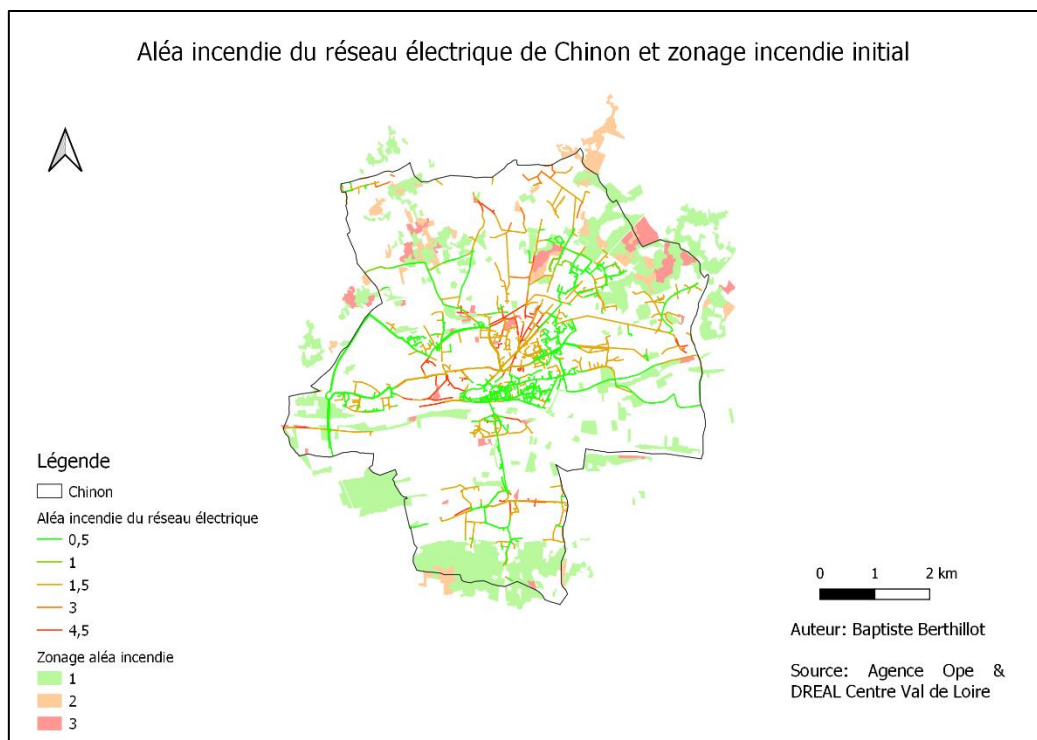


Figure 20 : Aléa incendie du réseau électrique de Chinon et zonage incendie initial – Baptiste Berthillot

A travers cette carte, on peut voir que les lignes présentant un aléa important sont les lignes situées proches d'un aléa fort. Le fait d'avoir ajouté un facteur suivant la nature des lignes a plutôt tendance à diminuer l'aléa pour un grand nombre de lignes. En effet, un certain nombre de lignes présentes aux abords d'un aléa fort prennent 1.5 comme valeur. Nous pouvons donc en déduire que le réseau est majoritairement souterrain. La partie la plus exposée semble être le nord du centre-ville au contraire du sud qui est plus épargné. Globalement, on peut retenir que le réseau est exposé sur sa quasi-totalité. Cette exposition s'explique avant tout par le fait que des massifs forestiers sont répartis sur l'ensemble de la commune.

Pour ce qui est de la vulnérabilité, la carte obtenue (voir partie II.B.4.c) permet d'observer de grandes disparités de vulnérabilité au sein du réseau. La partie la plus intéressante à analyser se situe au niveau du centre-ville de Chinon.

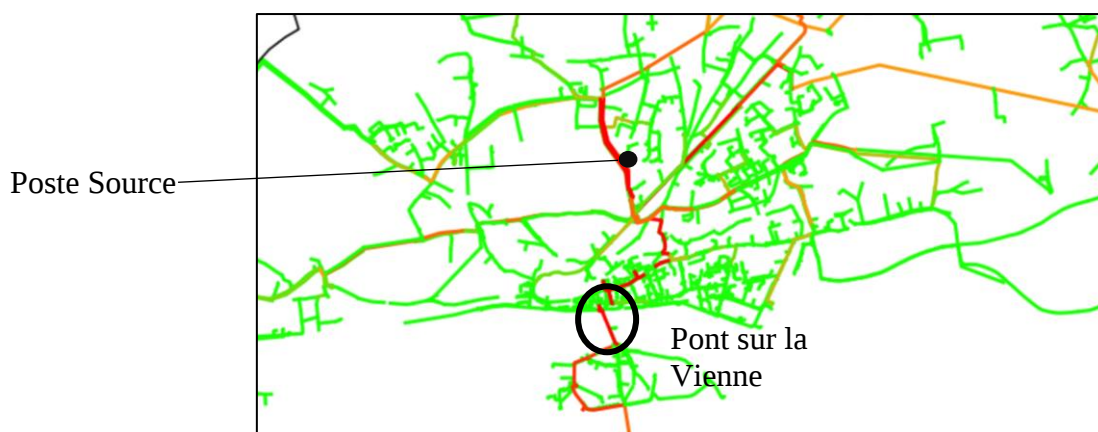


Figure 21 : Vulnérabilité du réseau électrique au niveau du centre-ville de Chinon – Baptiste Berthillot

Immédiatement, on remarque que les lignes les plus vulnérables du réseau sont principalement celles les plus proches du poste source. Cela s'explique que l'électricité acheminée vers n'importe quelle destination devra emprunter ces lignes. Leur importance dans le réseau est donc primordiale. Une autre ligne est également très vulnérable : celle traversant la rivière de la Vienne. C'est la seule ligne permettant d'acheminer de l'électricité dans le sud de la commune, elle est donc très importante aux yeux du réseau.

Enfin, la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité nous amène à pouvoir observer le risque sur le réseau électrique de Chinon.

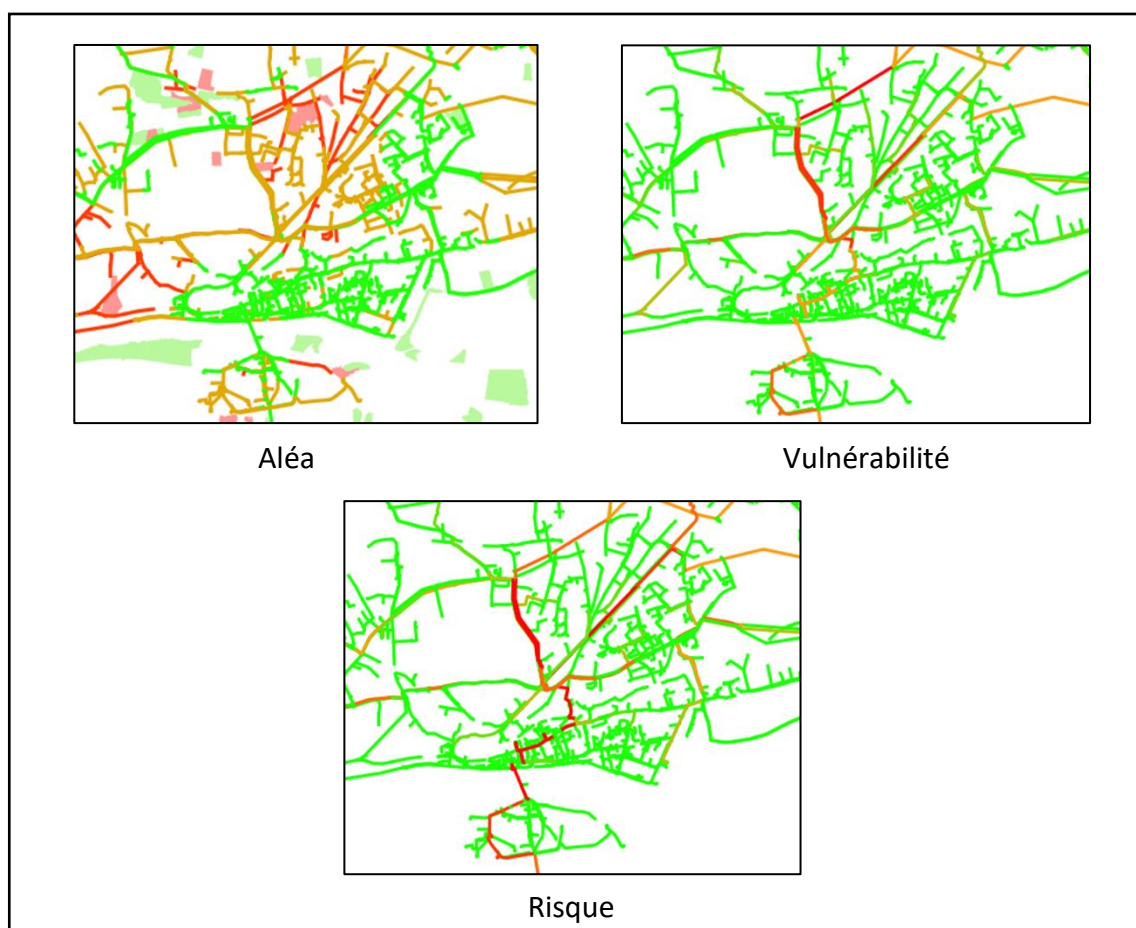


Figure 22 : Comparaison des trois cartes obtenues – Baptiste Berthillot

On peut voir que la carte de vulnérabilité est relativement proche de celle du risque. Cela s'explique par le fait que la plupart des lignes présentent une vulnérabilité très faible (de l'ordre de 10^{-3}) et que les lignes avec une vulnérabilité importante (celles en rouge ou orange) ont des valeurs qui tendent vers 1. Ainsi, le produit avec l'aléa qui présente des valeurs comprises entre 0.5 et 4.5 ne permet pas de changer les ordres de grandeur de la vulnérabilité. Une ligne très peu vulnérable ne peut pas devenir très à risque même si elle se trouve très proche d'un aléa fort.

Globalement, on peut donc retenir que le réseau est très à risque sur les lignes les plus empruntées. Dans le cas de Chinon, le poste source se trouve proche d'un périmètre ayant un aléa modéré à fort. Cela vient donc renforcer le risque de lignes déjà très vulnérables. On a un nombre restreint de lignes qui sont très à risque face au risque incendie et le reste du réseau l'est plutôt peu.

Pour apporter des éléments informatifs précis au gestionnaire du réseau, on pourrait lui lister les lignes très à risque. A lui de faire en sorte que le courant électrique puisse être distribué par d'autres lignes ou que les lignes à risque soient davantage protégées. Des simulations de coupure peuvent être aussi menées grâce à notre modèle en supprimant une partie des lignes selon des critères souhaités. Ensuite on recalcule la vulnérabilité et l'on peut observer sur quelle ligne se déplacent les flux qui empruntaient les lignes maintenant coupées. On pourrait aussi inviter le gestionnaire à choisir les valeurs numériques d'aléa grâce à une étude sur les différences de force entre un aléa faible, moyen ou fort. Ainsi, l'aléa aurait un réel impact sur la valeur de risque de chaque ligne.

D'un point de vue plus global, cette évaluation du risque incendie sur le réseau électrique nous permet de mettre en évidence qu'une commune comme Chinon n'est pas à l'abri d'un incident électrique majeur à cause d'un incendie. En effet, la présence d'un massif très inflammable à proximité de lignes directement reliées au seul poste source de la commune induit un risque très important pour cette partie stratégique du réseau. Ce constat fait alors appel à un certain nombre de mesures qui doivent être prises pour prévenir de ce risque. Une meilleure connexité du réseau pourrait par exemple permettre une répartition des flux différente et donc une autre répartition de la vulnérabilité sur le réseau. On peut également penser que des mesures pour agir sur l'aléa (taille des arbres, distances de sécurité, etc...) pourraient permettre d'éliminer au moins en partie le risque.

Le cas de Chinon est à mettre en perspective avec d'autres régions françaises puisque comme nous l'avons vu en partie I.E.2, l'Indre-et-Loire est un département relativement peu exposé au contraire de département dans le sud de la France qui doivent faire face à de nombreux incendies annuellement. On peut donc imaginer que si la question du risque incendie au sein des réseaux électriques est aussi peu traitée dans ces régions qu'en Indre-et-Loire, le risque porté par le réseau doit être encore plus important. Des incidents de coupures pourraient être donc à déplorer à une récurrence beaucoup plus importante qu'à Chinon.

7. Perspectives

Une fois notre modèle réalisé, la dernière partie de l'exercice de modélisation est l'évaluation de ses perspectives. Notre modèle s'est construit sur un certain nombre d'hypothèses et de partis pris. En développant les points qui nous éloignent de la réalité matérielle de notre sujet d'étude, nous allons mettre l'accent sur les améliorations possibles.

Au travers de plusieurs pistes nous allons développer quelles pourraient être les perspectives d'évolutions de ce travail.

Notre modèle présente tout d'abord l'avantage d'être reproductible pour n'importe quel autre réseau électrique exposé à un aléa naturel (incendie, inondation etc...). Il n'est en revanche pas optimisé pour calculer le risque d'un très grand réseau (à l'échelle nationale par exemple) car les temps de calcul observé pour Chinon ont déjà été conséquents (6h44 pour l'aléa). D'autres structures algorithmiques pourraient permettre de minimiser davantage le temps de calcul.

La première limite majeure de ce modèle est le choix des facteurs pour influencer sur l'intensité de l'aléa en fonction de la nature des lignes. Ce choix doit faire l'objet d'une étude électrique approfondie. Cette étude pourrait permettre de définir avec précision à quel point une ligne enterrée est protégée d'un incendie et inversement pour une ligne aérienne. Cette étude pourra également prendre en compte l'ensemble des dispositifs de protection directement présents sur le réseau. On peut parfaitement imaginer qu'il existe des structures de protection pour éviter la propagation du feu ou encore des dispositifs d'étanchéité pour protéger le réseau des inondations. La définition précise de toutes ces

mesures pourra encore permettre d'affiner le modèle et d'affecter à chaque ligne une valeur d'aléa plus précise.

Toujours au sujet de l'aléa, le panel de valeur qu'il peut prendre pourrait lui aussi être modifié. Comme nous avons pu le voir, il n'a qu'un faible impact sur le résultat final du risque. Les valeurs prises initialement (1, 2 et 3) sont possiblement à modifier pour que l'aléa puisse agir sur la valeur de risque. Néanmoins, cette modification ne peut se faire qu'à partir d'une étude précise des différences d'intensité entre un aléa faible, moyen ou fort.

Le deuxième point qui pourrait permettre d'affiner la précision du modèle est l'importance accordée aux différents points de destination. Nous avons considéré ici tous les flux comme équivalents donc chaque destination était identique du point de vue du flux. Ainsi, les lignes empruntées étaient vulnérables seulement à cause du nombre de flux les traversant. Pour augmenter l'importance d'une destination, on peut donc augmenter la quantité de flux allant à cette destination et de fait, toutes les lignes empruntées pour transporter ce flux seront plus vulnérables. Comme nous avons pu le voir lors du début de l'hiver de fin 2022, certaines activités sont jugées comme sensibles. On retrouve par exemple, les hôpitaux, les installations de signalisation ou les installations industrielles. (Service d'Etat, 2022) On pourrait donc déterminer quelles destinations rentrent dans les critères de priorisation et ensuite augmenter leur flux afin de refléter la réelle vulnérabilité des lignes que le courant électrique doit emprunter pour les alimenter.

Une autre piste de prolongement de ce PFE concerne la mesure de la résilience. Le modèle conçu ici permet uniquement d'établir des scénarios de résilience à un instant donné. En réalité, les flux d'électricité doivent être distribués à la totalité du réseau en tout instant. On pourrait donc avoir un modèle dynamique où la vulnérabilité du réseau et donc le risque varient en fonction des différentes demandes en électricité. Or, nous avons vu que la résilience intègre la capacité de « récupération de ses fonctions initiales » (Toubin et al., 2012b). L'intégration des durées de rétablissement du courant électrique dans un modèle dynamique permettrait alors d'avoir une valeur de résilience plus fidèle à sa définition théorique. Cette durée pourrait être estimée directement par le gestionnaire du réseau en fonction du secteur et des moyens alloués à la réparation des lignes électriques.

Cet aperçu des évolutions possibles de ce travail n'est en rien exhaustif et il existe vraisemblablement d'autres manières de poursuivre la réflexion autour de cette thématique. Néanmoins, ces exemples nous permettent de voir qu'il est tout à fait possible d'améliorer et de développer ce modèle.

Défense des Forêts Contre l'Incendie Communes des massifs à risque élevé

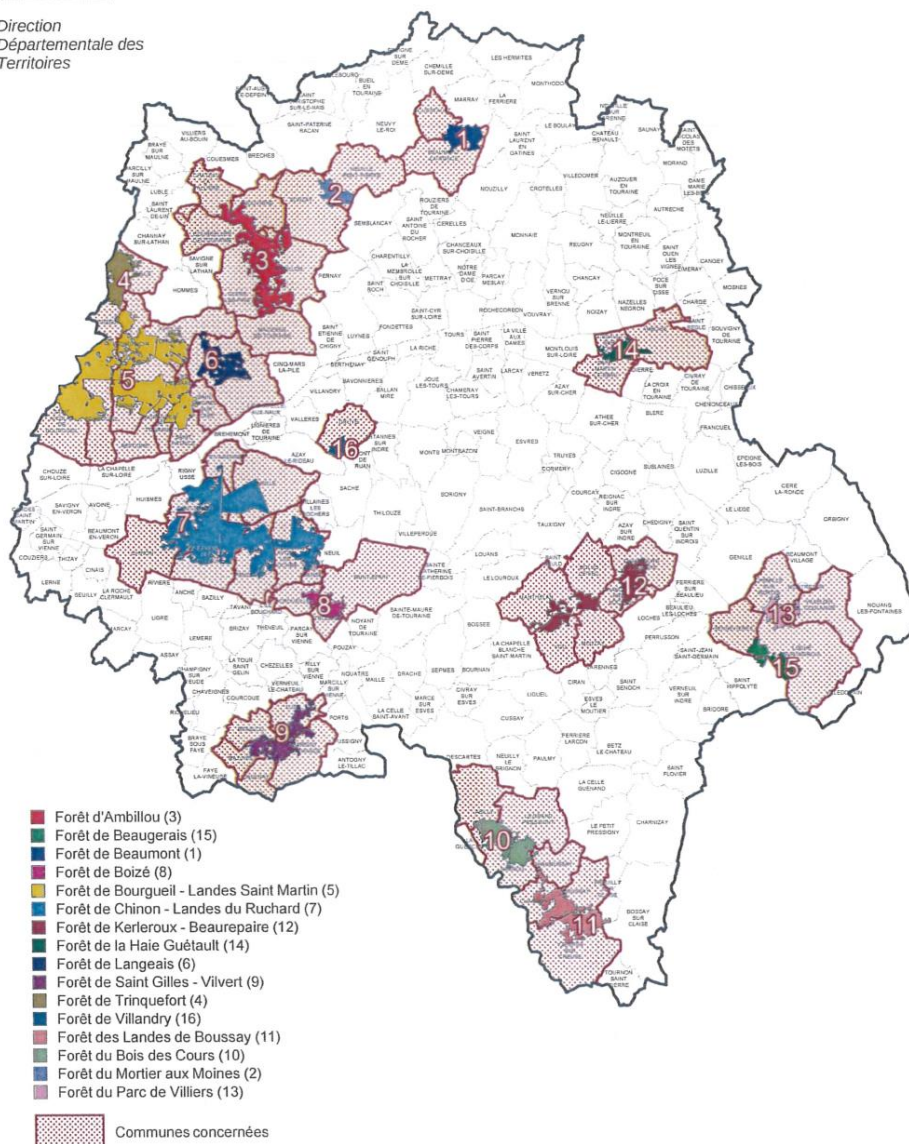


Figure 23 : Massifs boisés et communes d'Indre-et-Loire exposés au risque incendie – Préfecture
 d'Indre-et-Loire

A noter que Chinon (notre lieu d'étude) est une des communes concernées par le risque incendie à cause de sa proximité avec la forêt de Chinon – Landes du Ruchard.

Globalement, à l'échelle nationale comme départementale, le risque incendie est bel et bien présent à des degrés divers. Sur l'ensemble du territoire, les différences météorologiques impliquent de grandes différences d'exposition. En revanche, sur un département c'est plutôt la présence ou non de massifs boisés sur une commune qui va déterminer son degré d'exposition. On peut néanmoins retenir que ce travail s'applique à un phénomène concret et bien réel. Son application à Chinon en Indre-et-Loire n'est pas inutile malgré un risque incendie plus faible que dans d'autres départements français. Et il est d'autant plus utile que le risque incendie est amené à croître dans le futur comme vu au début de ce rapport (voir Introduction).

III. Pertinence de l'évaluation de la résilience

La mise en perspective de ce travail dans le contexte initial de résilience urbaine impose de se questionner sur la pertinence de vouloir rendre les réseaux électriques résilients. De manière encore plus générale, nous allons nous interroger sur la réelle faisabilité de la résilience urbaine.

La résilience est un terme couramment utilisé pour désigner des systèmes urbains mais un consensus existe pour affirmer qu'elle est encore trop peu appliquée aux différentes stratégies et politiques de gestion des risques (Heinzlef, 2019a). Cette présence encore faible s'explique par sa relative jeunesse dans la gestion des risques mais également par certains inconvénients :

- C'est un concept pluridisciplinaire pouvant entraîner des incompréhensions des objectifs
 - C'est un concept encore abstrait
 - Il n'existe que peu d'opérationnalisation
- (Heinzlef, 2019a)

Ces inconvénients sont bel et bien réels mais l'on peut alors se demander s'ils sont surmontables et non des limites à nos volontés de résilience. Plusieurs travaux traitent de la résilience avec un regard critique et cherchent à lui donner des limites.

La première limite rejoint les inconvénients sur son côté abstraite et peu opérationnelle. Derrière ces constats se cache une réelle difficulté à « politiser la résilience » (Benitez et Reghezza, 2018). Il est en effet souvent très difficile d'identifier les capacités d'un territoire donné pour en dégager un modèle normatif. La résilience fait appel à un ensemble de « capacités à faire face » (Benitez et Reghezza, 2018) qui sont très propres au territoire concerné. De là, les réponses apportées pour répondre au problème sont très spécifiques à chaque cas de figure. Il est donc très difficile de dresser un « mode d'emploi » de la résilience pour un sujet donné qui soit applicable à tous les territoires. La résilience urbaine reste donc très générale et entre assez peu dans des dimensions techniques et opérationnelles (Benitez et Reghezza, 2018).

Ensuite, bien qu'elle n'existe peu aujourd'hui, plusieurs villes considèrent qu'elle est atteignable en jouant sur trois paramètres généraux : « la structure du bâti et nature des matériaux des constructions (matériaux isolants, réfléchissants, toits ou façades végétalisés, hauteur du bâti, etc.) ; les caractéristiques des infrastructures municipales et des principales « lignes de vie » (diversification des sources d'alimentation et redondance des réseaux d'eau, d'énergie, de déchets, de transports publics, etc.) » (Quenault, 2013). Ces paramètres apportent certes des solutions à priori applicables mais sont tous de nature « ingénieriaux et technologiques » (Quenault, 2013). La résilience telle qu'on l'a décrite ici ne prend pas du tout en compte les phénomènes sociaux (inégalités, isolements, fragmentation, etc...). On peut dès lors se questionner sur la réelle mesure du champ d'action de la résilience et sa viabilité à long terme (Quenault, 2013).

En clair, la résilience urbaine (dont les réseaux électriques) est l'amorce d'une gestion des risques nouvelle qui jouera un rôle important dans le futur. Cependant, cette résilience doit être confrontée à des aspects qu'elle n'englobe pas ou peu. Elle n'est que trop peu opérationnelle car très spécifique. Et lorsqu'elle l'est, elle a tendance à ne considérer que des dimensions techniques en négligeant les évolutions sociales propres aux sociétés humaines. Ces constats font écho au cas des réseaux électriques. En effet, nous pouvons nous demander dans quelle mesure il sera possible de décrire quelle structure ou quels aménagements pourraient rendre un réseau électrique résilient. Chaque lieu d'étude possède un historique, une morphologie et des contraintes qui lui sont propres et qu'on ne peut contourner. Et quand bien même nous pourrions le faire, notre mesure de résilience et nos

consignes négligeraient certains aspects difficilement intégrables dans une modélisation comme nous venons de faire. On peut finalement considérer que ce travail s'inscrit dans une démarche de résilience en répondant à une partie du problème posé mais l'étude globale doit prendre en compte bien d'autres aspects.

Conclusion

Pour conclure ce travail, nous avons donc pu appréhender comment la gestion du risque incendie et plus largement la résilience urbaine, pouvaient être définies et représentées.

L'urgence climatique et l'avenir promis à l'électricité nous impose la prise en compte de la résilience. La décomposition du risque incendie en un aléa et une vulnérabilité nous ont permis de comprendre ses contours. Cette méthodologie est celle employée dans les plans de prévention des risques naturels mais il a surtout été intéressant de voir qu'en matière d'incendie, les réseaux électriques ne sont que trop peu étudiés. De ce constat, nous avons donc cherché à modéliser le risque qui pèse sur ces réseaux face aux feux de forêts. Au travers d'une partie calculatoire puis cartographique nous avons pu établir une carte du risque incendie présent sur le réseau électrique de Chinon. Cette carte appelle à des améliorations futures qui pourront permettre d'évaluer plus précisément la résilience d'un réseau électrique. Cette résilience est finalement l'objectif ultime en matière de gestion des risques. Elle intègre la lutte contre l'aléa, la réduction de la vulnérabilité et du risque mais également des dimensions beaucoup plus larges qui invitent à repenser les milieux urbains en profondeur.

La finalité de ce travail a permis de d'ores et déjà repérer les points de sensibilité d'un réseau électrique vis-à-vis d'un aléa, de repérer les lignes vulnérables et de dresser une carte du risque. Si la méthodologie de calcul peut être modifiée, les résultats obtenus peuvent néanmoins être exploités pour réduire le risque sur un réseau donné.

L'ensemble des travaux de recherche ont permis de mettre en lumière le fait que les notions abordées comme le risque incendie ou la résilience sont très vastes. Ils font appel à des phénomènes complexes et interreliés qu'il est difficile de prendre en compte complètement dans un seul et même travail. La modélisation réalisée a proposé une méthodologie d'évaluation du risque incendie en s'appuyant sur les conventions actuelles en matière de gestion des risques. De cette base, sa poursuite pourrait permettre d'approfondir certains points, de renforcer le modèle de calcul et d'apporter une réponse encore plus précise à la question posée initialement.

BIBLIOGRAPHIE

- Benitez, F. et Reghezza, M. (2018). Les capacités à faire face ou comment repenser la résilience des individus. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 30).
<https://doi.org/10.4000/vertigo.19116>
- Carbone 4. (2021). *Les réseaux électriques, un enjeu majeur de la résilience climatique* | Carbone 4.
<https://carbone4.com/fr/article-reseaux-electriques-resilience-climatique>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters & United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2020). *The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019)*.
https://www.preventionweb.net/files/74124_humancostofdisasters20002019reportu.pdf?_gl=1*547e3*_ga*Njl3MjQ2MDE1LjE2NjkyOTg3MDk.*_ga_D8G5WXP6YM*MTY2OTI5ODcwO C4xLjAuMTY2OTI5ODczMC4wLjAuMA..
- CEREMA. (2018). *Prise en compte du risque incendie de forêts dans l'urbanisme*.
<https://www.cerema.fr/system/files/documents/2019/03/Note%20du%20Cerema%20pour%20la%20r%C3%A9daction%20des%20PAC%20-%20risque%20feu%20de%20for%C3%AAt.pdf>
- Chanti, H. (2017, juillet). *Développement d'un outil d'évaluation performantielle des réglementations incendie en France et dans les pays de l'Union Européenne* [theses, Université de Haute Alsace - Mulhouse]. <https://theses.hal.science/tel-01721603>
- Cosson, M. (2016, 19 septembre). *Stabilité du réseau électrique de distribution. Analyse du point de vue automatique d'un système complexe* [phdthesis, Université Paris-Saclay].
<https://theses.hal.science/tel-01374469>
- data.gouv. (2022). *Agence ORE - data.gouv.fr*. <https://www.data.gouv.fr/fr/organizations/agence-ore-3/>
- Diop, F. (2018, 25 juin). *Analyses probabilistes pour l'étude des réseaux électriques de distribution* [phdthesis, Université Paris Saclay (COMUE)]. <https://theses.hal.science/tel-01936560>

- Direction Départementale des Risques Majeurs, I.-L. (2021). *Dossier départemental des risques majeurs*. [https://www.indre-et-loire.gouv.fr/content/download/30539/197282/file/DDRM%20version%20avril%202021%20compress%C3%A9_compressed\(1\).pdf](https://www.indre-et-loire.gouv.fr/content/download/30539/197282/file/DDRM%20version%20avril%202021%20compress%C3%A9_compressed(1).pdf)
- DREAL. (2021). *Atlas du risque de feux de forêt en Centre – Val de Loire*. Préfecture de la région Centre - Val de Loire. https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/atlas_du_risque_feux_de_foret_en_centre-val_de_loire_v2021-11.pdf
- EDF. (2020). Incendie électrique : quelles sont les causes fréquentes ? *IZI by EDF*. <https://izi-by-edf.fr/blog/incendie-electrique-causes/>
- Géoconfluences. (2021). *Vulnérabilité — Géoconfluences* [terme]. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/vulnerabilite>
- Géoconfluences. (2022a). *Risque — Géoconfluences* [terme]. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/risque-s>
- Géoconfluences. (2022b). *Risque — Géoconfluences* [terme]. Ressources de géographie pour les enseignants. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/risque-s>
- Gouvernement de l'Ontario. (2022). *Comportement des feux de forêt*. ontario.ca. <http://www.ontario.ca/fr/page/comportement-des-feux-de-foret>
- Heinzlef, C. (2019a, 4 décembre). *Improving territorial resilience conditions bordering rivers dammed in the PACA region : development of a spatial tool to aid decision for urban programming* [phdthesis, Université d'Avignon ; Université de Mons]. <https://theses.hal.science/tel-02893161>
- Heinzlef, C. (2019b, 4 décembre). *Modélisation d'indicateurs de résilience urbaine face au risque d'inondation : co-construction d'un système spatial à la décision pour contribuer à l'opérationnalisation du concept de résilience* [phdthesis, Université d'Avignon ; Université de Mons]. <https://theses.hal.science/tel-02893161>

Localtis. (2022). *Vulnérabilité des réseaux au changement climatique : France Stratégie propose de mener des expérimentations dans des territoires volontaires*. Banque des Territoires.
<https://www.banquedesterritoires.fr/vulnerabilite-des-reseaux-au-changement-climatique-france-strategie-propose-de-mener-des>

Ministère de la transition écologique. (2022a). *Les feux de forêt - Dossier d'information*.
<https://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-feux-foret>

Ministère de la transition écologique. (2022b). *Prévention des feux de forêt*. Ministères Écologie Énergie Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-feux-foret>

Niandou, H. et Sauce, G. (2009). Analyse de risque incendie sur un ERP, 101.

Préfecture de Loire-Atlantique. (2014). *Réglement PPRI Loire Aval*. <https://www.loire-atlantique.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Risques-naturels-et-technologiques/Prevention-des-risques-naturels/Plans-Prevention-Risques-Naturels-Previsibles/Les-plans-de-Prevention-des-Risques-Inondation-en-Loire-Atlantique/Le-PPRI-de-la-Loire-aval-dans-l-agglomeration-nantaise>

Préfecture d'Indre-et-Loire. (2013). *Classement des forêts particulièrement exposées au risque incendie / Prévention des incendies / Forêt / Agriculture, forêt et développement rural / Politiques publiques / Accueil - Les services de l'État en Indre-et-Loire*. <https://www.indre-et-loire.gouv.fr/Politiques-publiques/Agriculture-foret-et-developpement-rural/Foret/Prevention-des-incendies/Classement-des-forets-particulierement-exposees-au-risque-incendie>

Préfecture du Gard. (2021). *PDPFCI - Gestion du risque feu de forêt - Risques - Sécurité et protection de la population - Actions de l'État - Les services de l'État dans le Gard*.
<https://www.gard.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Securite-et-protection-de-la-population/Risques/Gestion-du-risque-feu-de-foret/PDPFCI>

- Quenault, B. (2013). Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique. *EchoGéo*, (24).
<https://doi.org/10.4000/echogeo.13403>
- Rapport du Giec : une intensification « sans précédent » du changement climatique. (2021, 14 septembre). Réseau Action Climat. <https://reseauactionclimat.org/rapport-giec-climat-2021/>
- RTE. (2021). *Futurs énergétiques 2050 Principaux résultats - résumé exécutif*. RTE. <https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-12/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats.pdf>
- Sapeurs Pompiers de France. (2022). *Organisation des sapeurs-pompiers en France*. Pompiers.fr.
<https://www.pompiers.fr/pompiers/nous-connaître/organisation-des-sapeurs-pompiers-en-france>
- SDIS 37. (2019). *Rapport d'activité 2019*. Sapeurs-pompiers de Touraine.
<https://www.calameo.com/sdis37/read/0021374115110a7eb1c0b>
- Serre, D. (2013). La ville résiliente aux inondations Méthodes et outils d'évaluation, 174.
- Serre, D. (2015). Les réseaux techniques urbains : des infrastructures essentielles pour la mise en place de stratégies de résilience. *Sécurité et stratégie*, 18(1), 28-35.
<https://doi.org/10.3917/sestr.018.0028>
- Serre, D. (2016a). Advanced methodology for risk and vulnerability assessment of interdependency of critical infrastructure in respect to urban floods. *E3S Web of Conferences*, 7, 07002.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160707002>
- Serre, D. (2016b). Concevoir la résilience urbaine: un défi face à des complexités, 17.
- Service d'Etat, L. A. (2022). *Délestage électrique - Sécurité et protection des populations - Actions de l'État - Les services de l'État en Loire-Atlantique*. <https://www.loire-atlantique.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Securite-et-protection-des-populations/Delestage-electrique>

- Toubin, M., Lhomme, S., Diab, Y., Serre, D. et Laganier, R. (2012a). La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ? *Développement durable et territoires*, (Vol. 3, n° 1). <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9208>
- Toubin, M., Lhomme, S., Diab, Y., Serre, D. et Laganier, R. (2012b). La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ? *Développement durable et territoires*, (Vol. 3, n° 1). <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9208>
- Veyret, Y. et Laganier, R. (2017). Inondations. Dans *Dictionnaire Collectivités territoriales et Développement Durable* (p. 255-261). Lavoisier. <https://www.cairn.info/dictionnaire-collectivites-territoriales-et-develo--9782743022358-p-255.htm>



Directeur.rice de recherche : Mathilde Gralepois en collaboration avec Minjid Maïzia

Baptiste Berthillot

**PFE/DAE5
UIT/Reseau
2022-2023**

Risque incendie au sein du réseau électrique : Construire la ville résiliente

Intégrer les réseaux urbains électriques dans les projets d'aménagement en Zone Incendie

Résumé :

Le dérèglement climatique est assurément le défi majeur auquel doit répondre l'humanité au 21^{ème} siècle. Ses effets peuvent prendre de multiples formes. Parmi eux, l'augmentation de la récurrence de catastrophes naturelles est particulièrement préoccupante et les politiques de gestion des risques doivent être renforcées. Les réseaux électriques sont l'exemple d'infrastructures particulièrement sensibles que l'on doit protéger. Si des dispositions existent pour certaines catastrophes, le risque incendie sur les réseaux électriques est encore peu traité. Pourtant, les aléas incendie sont bien présents sur une grande partie du territoire français. Par ailleurs, la structuration de certains réseaux très centralisés cause une grande vulnérabilité. Pour faire face à ces problèmes, les gestionnaires de réseau et les puissances publiques cherchent à s'informer sur ce risque incendie. Une meilleure connaissance du risque peut permettre de le réduire efficacement et d'atteindre une certaine forme de résilience. Derrière ce terme que nous aurons l'occasion de développer se cache l'idée simple de résister et d'encaisser une catastrophe sans avoir à déplorer d'incidents majeurs. Ainsi, ce travail s'inscrit dans cette logique et tente d'apporter des moyens de mesure avec une modélisation du risque incendie sur le réseau électrique de Chinon.

Mots Clés : Incendie, Risque, Aléa, Vulnérabilité, Réseau électrique, Résilience