

MPARAISON À UNE STRUCTURE SPATIALE THÉORIQUE INDUITE PAR L'ORGANISATION DU RÉSEAU DE TRANSPORT ÉLECTRIQUE

6.3.1. Les tessellations de Voronoï pondérées de manière multiplicative (VPM) pour modéliser les bassins de dépendance au réseau électrique.

La comparaison des résultats obtenus dans une démarche empirique de fusion de données spatiales rétrospectives, hétérogènes, incomplètes et incertaines (partie 6.2) avec ceux obtenus par une structuration théorique, statique et morphologique de l'espace par les réseaux électriques (partie 6.3) est menée avec le souci de répondre à trois objectifs :

- tester la fiabilité des résultats empiriques.
- progresser en termes de compréhension des structurations spatiales des systèmes de risques en réseaux.
- progresser en termes de modélisation spatiale des systèmes de risques et d'utilisation des méthodes de géométrie computationnelle pour optimiser la délimitation des zones de dépendance associées à chacun des postes électriques.

L'information utilisée dans la partie 6.3.1 ne porte pas sur la coupure électrique mais sur l'organisation du réseau électrique barcelonais considéré à travers la localisation des postes de transformations électriques. La démarche consiste à s'interroger sur la manière dont le réseau d'électricité différencie spatialement le territoire barcelonais puis à comparer, par une analyse de variance, les structures spatiales obtenues avec la répartition des indices empiriques fusionnés en partie 6.2.

Nous avions précédemment eu recours à une méthode de tessellations hiérarchiques pour modéliser le caractère imbriqué des réseaux électriques (réseaux de transport et réseaux de distribution). La méthode de tessellations pondérées est utilisée cette fois-ci pour tenir compte de la variabilité des niveaux de voltages entre les postes de transformation du réseau de transport électrique. Il existe donc une hiérarchie qui serait de l'ordre vertical dans l'imbrication du réseau de transport et du réseau de distribution modélisée par les tessellations de Voronoï hiérarchiques (VH), alors qu'elle serait de l'ordre horizontal pour la variabilité des niveaux du voltage du réseau de transport électrique, modélisée par les tessellations pondérées (VPM).

Nous rappelons que la structure très hiérarchisée du réseau de transport électrique et la diversité des niveaux de voltages en entrée et en sortie des postes de transformations électriques conduisent à avoir recours aux techniques de pondération des tessellations de Voronoï qui permettent de différencier les points du semis en termes de poids et donc de sphères d'influence. La technique de pondération, dite multiplicative, ne considère pas la distance réelle entre les points, mais la distance multipliée par une valeur de pondération associée à chaque point pour construire la tessellation. Dans notre cas, les valeurs de pondération correspondent aux niveaux de voltage du courant à l'entrée du poste de transformation électrique. Les 15 postes sources situés sur la commune barcelonaise seront donc distingués en 3 catégories : 220 kV, 110 kV et 66kV.

Les tessellations n'ont pas été directement construites dans le système d'information géographique, mais à partir du logiciel WVD (2005), Weighted Voronoi Diagram, application développée en Visual Basic, dans le cadre de la recherche doctorale en géomatique de Mu Lan de l'université de Berkeley (MU, 2005). La bonne interopérabilité entre le logiciel WVD et les logiciels SIG, liée à la capacité d'intégrer au logiciel des données au format (.shp) a largement motivé notre choix. A notre connaissance, le logiciel WVD n'avait pas encore fait l'objet d'applications dans la thématique des risques et des réseaux électriques, néanmoins il nous faut préciser qu'il existe d'autres manières de délimiter les bassins de dépendances électriques, comme les automates cellulaires (Fenwick, Dowell, 1998) ; d'autre part, les polygones de Voronoï pondérés ont déjà fait l'objet, depuis un certain temps, de recherches en analyse spatiale (Huff, 1973) et en optimisation de la planification électrique.

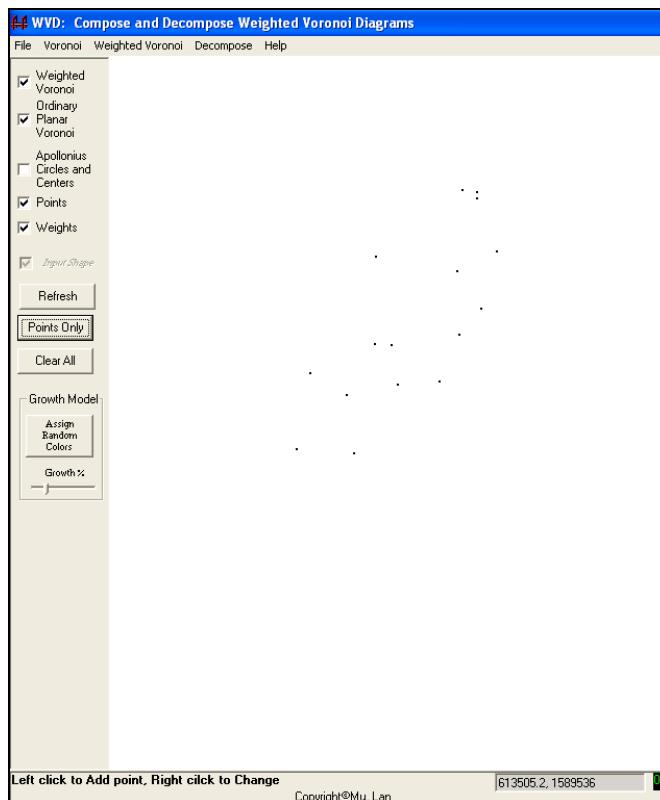


Figure 56 : Implémentation du semis de points correspondant aux postes de transformation électrique de Barcelone dans l'interface WVD.

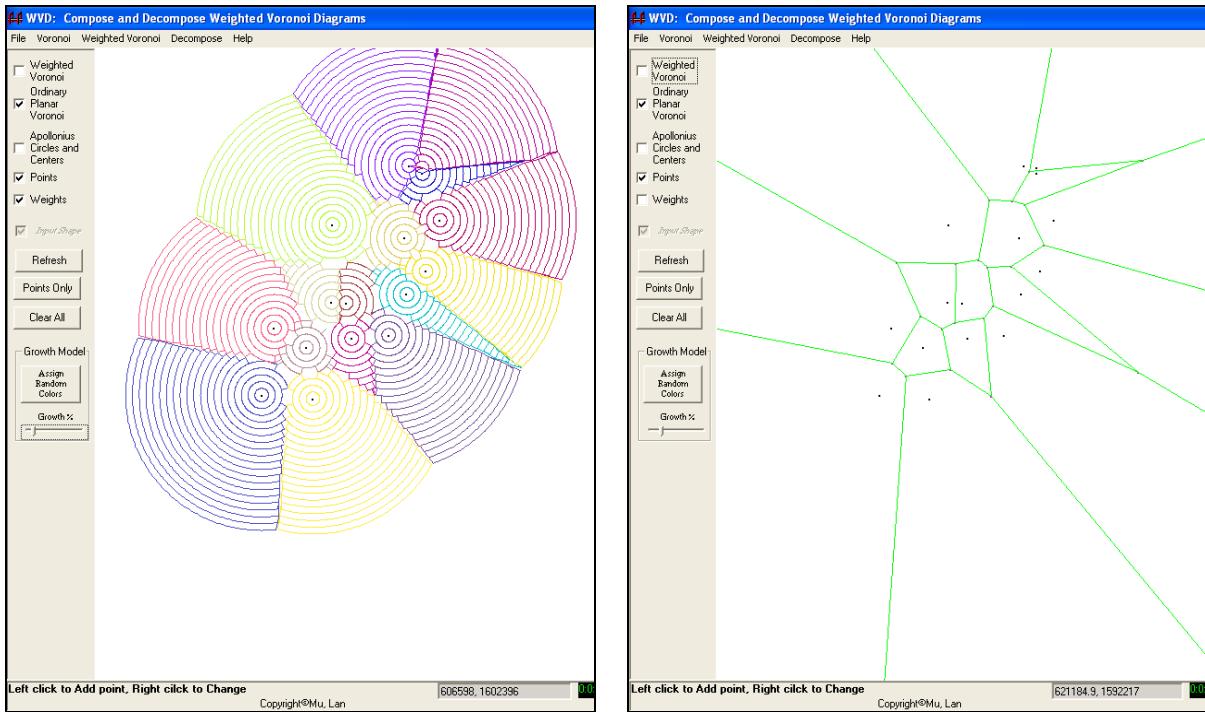
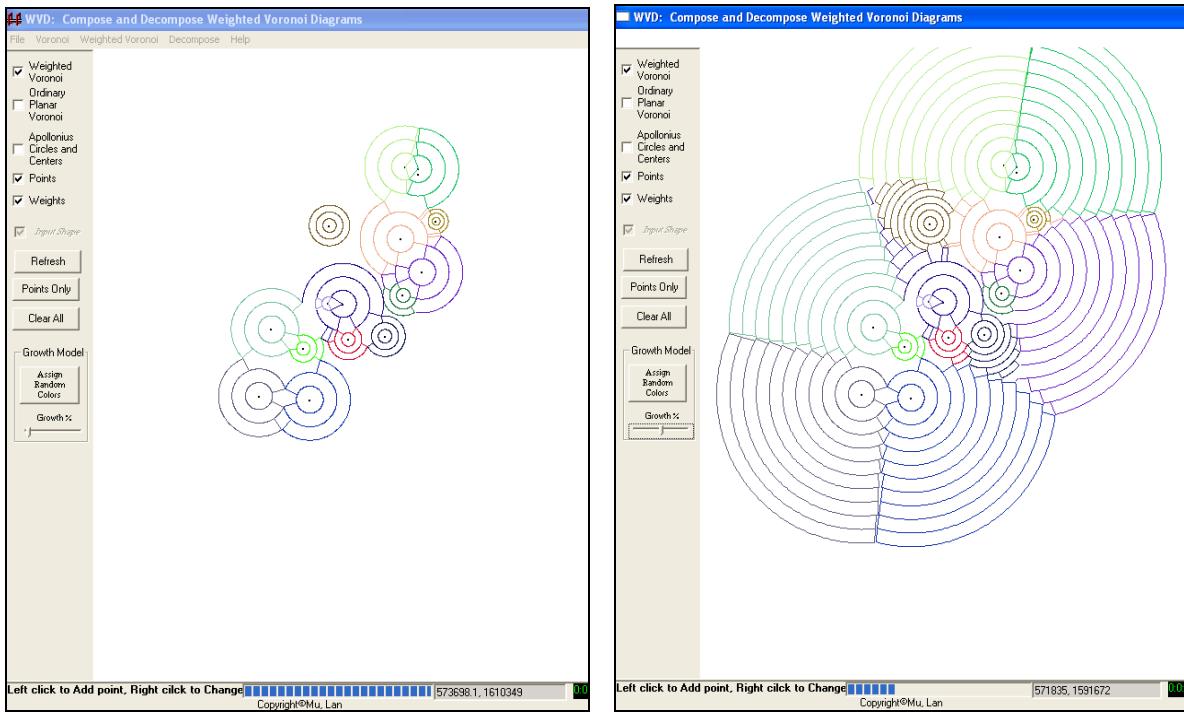


Figure 57 : Construction du diagramme de Voronoï standard associé aux postes de transformations du réseau électrique de Barcelone dans l'interface WVD.



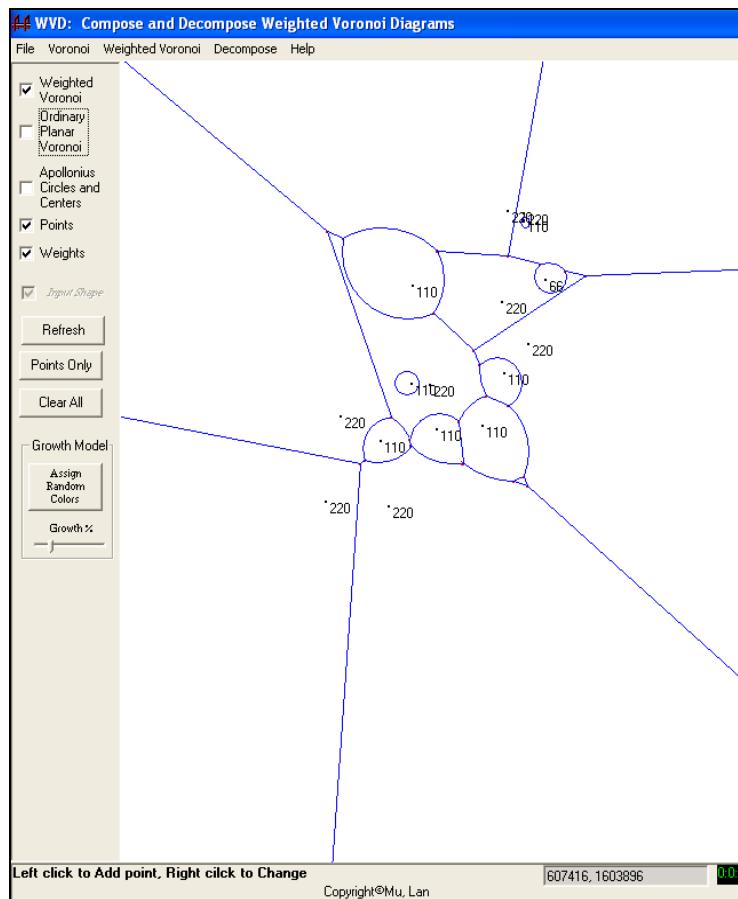
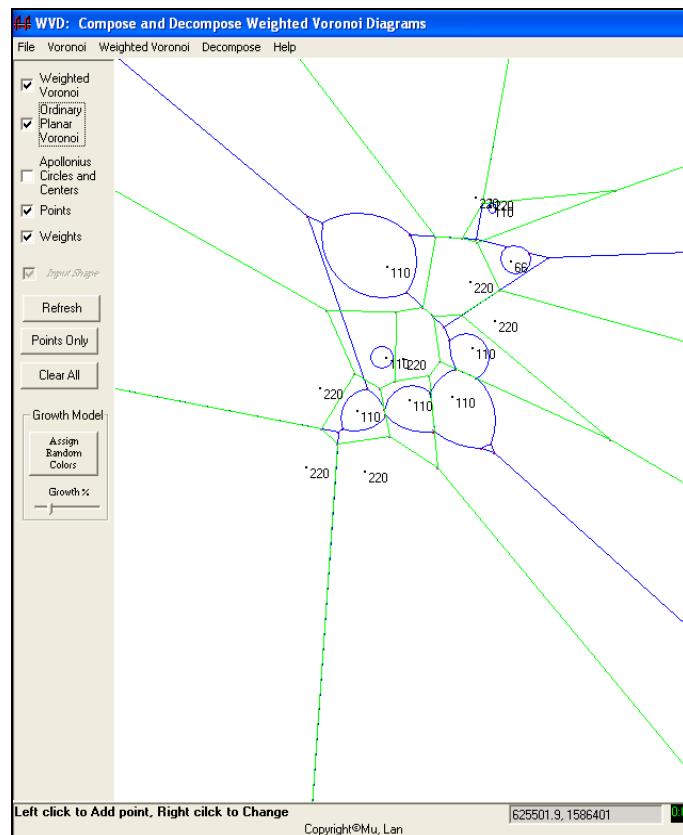


Figure 58 : Construction des polygones de Voronoï pondérés de manière multiplicative associés aux postes de transformations du réseau électrique de Barcelone.



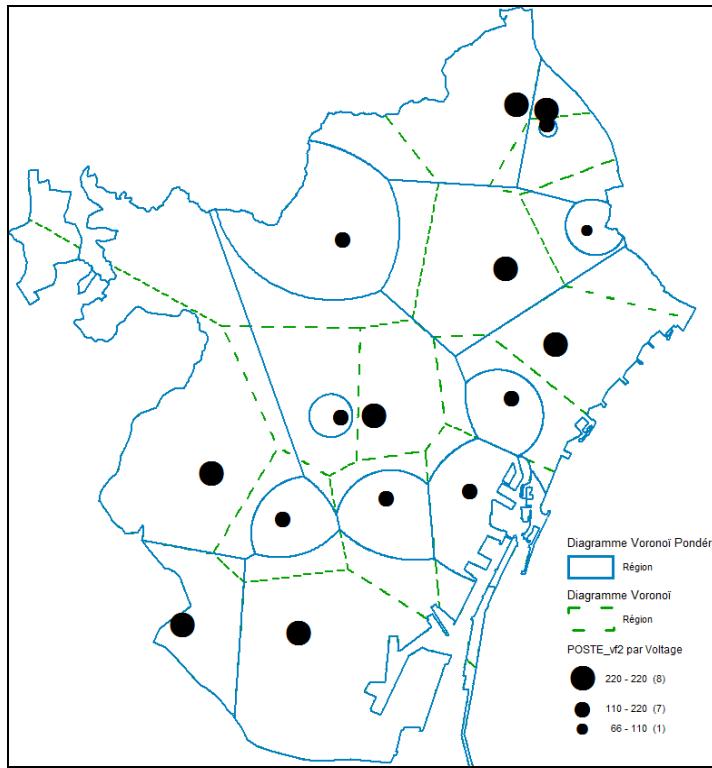


Figure 59 : Comparaison des structures spatiales obtenues avec les polygones de Voronoï standard (en vert) et les polygones de Voronoï pondérés (en bleu) et croisement aux limites communales de Barcelone.

Dans la figure 57, on observe que les cercles successifs qui correspondent à chaque itération, à partir d'un poste électrique, possèdent tous des rayons identiques. Cet élément provient du caractère non pondéré de la tessellation construite. A l'inverse, dans le cas de la figure 58, il est à remarquer que les nœuds de départ sont entourés de rayons différents qui correspondent aux trois niveaux de voltages des postes électriques auxquels ils peuvent être associés.

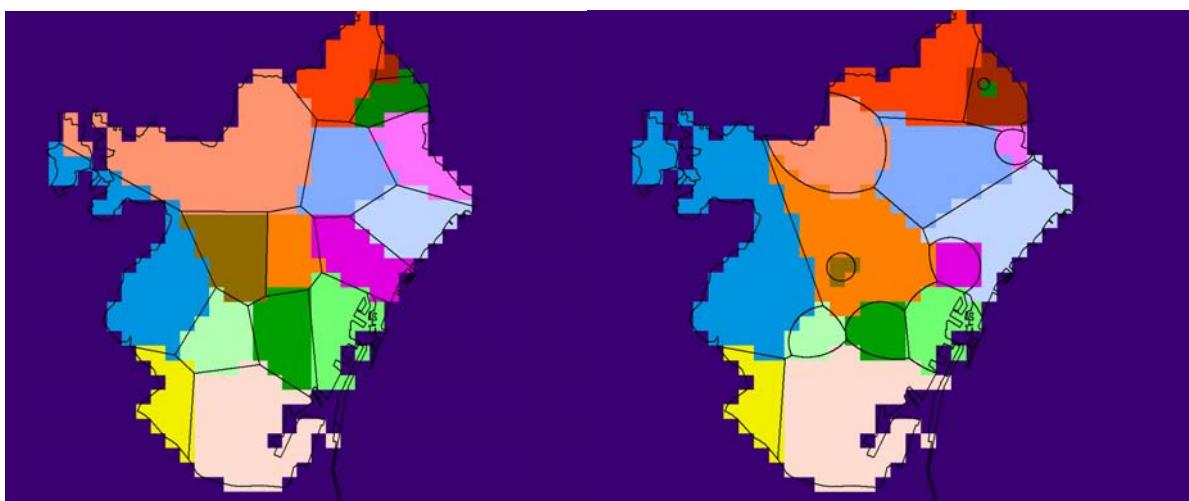
Il faut noter également, l'aspect moins rectiligne des délimitations obtenues avec la tessellation pondérée, qui permet la formation de lignes courbées pour délimiter les bassins de dépendance. D'un point de vue théorique, sans reprendre l'ensemble de propriétés géométriques des tessellations pondérées (Okabé, 2000), il est tout de même important de souligner que les polygones de Voronoï pondérés peuvent contenir des trous, c'est-à-dire des espaces qui ne seraient rattachés à aucun polygone.

La méthode pondérée permet également une structuration imbriquée, par exemple la zone de desserte du poste 110 kv de Corts, est contenue entièrement dans celle du poste 220 kV de Urgell alors qu'elle lui est simplement connexe d'après la méthode de tessellation standard (figure 57). Plusieurs autres différences morphologiques assez nettes entre les deux tessellations sont observables sur la figure 59. Néanmoins à ce stade, nous ne sommes pas en mesure de dire laquelle des deux structures correspond le plus à la réalité.

6.3.2. Analyse de variance et effets d'appartenance spatiale des distributions empiriques

Pour tenter de répondre à cette question nous allons nous appuyer sur les données empiriques fusionnées à l'échelle des grilles, dans la section 6.2, en partant de l'idée que la différenciation spatiale des indices empiriques est structurée par les bassins de dépendances des postes électriques estimés en section 6.31. Ainsi, nous profiterons du fait que la coupure électrique produit une différenciation spatiale (puisque l'approvisionnement électrique devient hétérogène à l'échelle du territoire), pour tester des hypothèses sur les structures spatiales théoriques adaptées à la délimitation des zones de desserte du réseau électrique.

Les bassins obtenus avec les polygones de Voronoï standard et ceux pondérés seront donc testés successivement de manière à déterminer laquelle de ces deux structures théoriques optimise la concordance avec les données observées sur la coupure électrique et l'homogénéité des indices pour les mailles appartenant à une même cellule de Voronoï. Dans un premier temps, chaque maille de 500 mètres a été rattachée à un bassin de dépendance théorique. Les mailles enchevêtrées entre deux bassins ou plus, sont rattachées systématiquement au bassin qui contient la plus grande surface de la maille, de manière à ce que chaque maille appartienne à un seul groupe de cellules.



Carte 61 : Attribution des cellules de 500 mètres aux bassins de dépendances des postes de transformation électrique (tessellations standard à gauche et pondérée à droite).

L'analyse de variance est menée en considérant les indices de la section 2 comme des données quantitatives, et l'appartenance à un bassin de dépendance d'un poste électrique comme donnée qualitative. La décomposition de la variance totale en variance intragroupe et en variance intergroupe doit nous permettre de déterminer si les mailles de 500 mètres appartenant à une même cellule de Voronoï ont tendance à davantage se ressembler (en termes d'indice empirique) qu'elles ne ressemblent aux mailles appartenant aux autres cellules. L'analyse de variance a été appliquée pour les indices fusionnés de manière additive (carte 57) puis pour les indices fusionnés de manière multiplicative (carte 58). On obtient les résultats suivants :

POLYGONES DE VORONOÏ STANDARD

Indice fusion additive

$$V(\text{tot}) = V(\text{inter}) + V(\text{intra})$$

$$603.1 = 274,85 + 328.25$$

$$\mathbf{R = 0.675}$$

$$\mathbf{r^2 = 0.46}$$

Indice fusion multiplicative

$$V(\text{tot}) = V(\text{inter}) + V(\text{intra})$$

$$354,77 = 127,56 + 227,21$$

$$\mathbf{R = 0.600} \quad \mathbf{r^2 = 0.36}$$

POLYGONES DE VORONOÏ PONDÉRÉS

Indice fusion additive

$$V(\text{tot}) = V(\text{inter}) + V(\text{intra})$$

$$603.1 = 323.99 + 279.11$$

$$\mathbf{R = 0.733}$$

$$\mathbf{r^2 = 0.54}$$

Indice fusion multiplicative

$$V(\text{tot}) = V(\text{inter}) + V(\text{intra})$$

$$354.77 = 134.276 + 220.51$$

$$\mathbf{R = 0.615} \quad \mathbf{r^2 = 0.38}$$

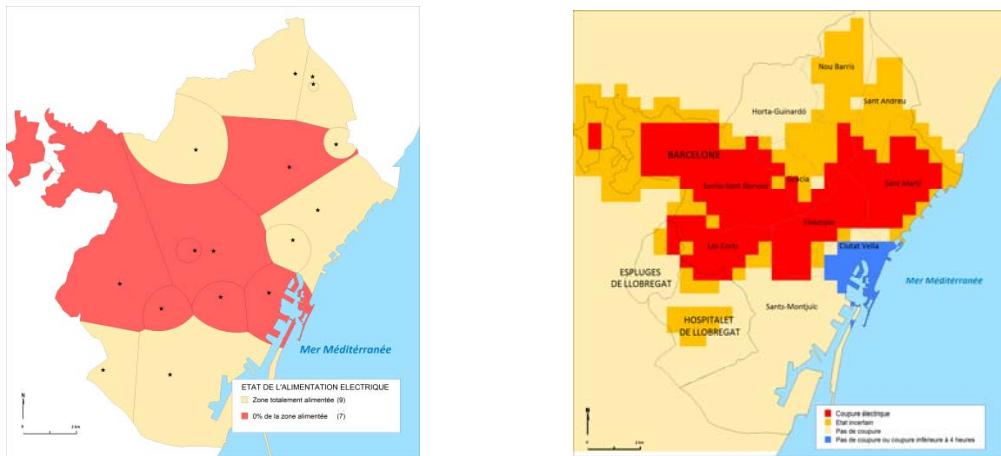
Figure 60 : Synthèse des résultats de l'analyse de variance sur les polygones de Voronoï standard et pondérés.

Les résultats de l'analyse de variance présentés en figure 60 indiquent que l'effet d'appartenance spatiale semble plus marqué avec les polygones de Voronoï pondérés. Dans le cas des indices fusionnés de manière additive, comme dans celui des indices fusionnés de manière multiplicative, l'intensité de la relation est plus importante lorsque les tessellations sont pondérées en fonction du voltage des postes de transformation. D'autre part, les indices fusionnés de manière additive obtiennent de meilleurs résultats que ceux fusionnés de manière multiplicative ; cette observation confirme notre observation de la partie 6.2.3 sur le caractère trop contraignant de la fusion multiplicative, compte tenu de l'incomplétude de notre base de données.

6.3.3. Intégration de la base de données sur les dommages aux postes électriques et comparaison des résultats

La base de données @pagon comprend une base de données SIG sur les territoires coupés qui a fait l'objet des traitements de la partie 6.2 ; elle comprend également une base de données temporelles sur l'état de fonctionnement des postes électriques qui n'a, pour l'instant, été aucunement intégrée dans l'analyse. Cette base de données décrit les 16 postes sources du réseau électrique de Barcelone en fonction de la part d'alimentation électrique assurée par chaque poste ; ce taux peut varier de 100% (fonctionnement normal) à 0% (aucune alimentation électrique dans la zone de dépendance d'alimentation du poste). La carte 62 présente une cartographie des postes de transformation et des bassins de dépendance associés, impactés à un moment ou un autre, au cours de la panne électrique. En tenant compte des résultats de la sous-partie précédente, nous avons fait le choix d'utiliser les polygones de Voronoï pondérés de manière multiplicative comme structure spatiale théorique de référence pour les zones de dépendance associées à chaque poste électrique. Les résultats, mis en

parallèle de ceux obtenus par fusion additive des observations empiriques laissent apparaître des concordances importantes.



Carte 62 : Comparaison des espaces affectés par la coupure, d'après la simulation des polygones de Voronoï pondérés (à gauche) et la méthode de fusion de données empiriques (à droite).

6.4. ANALYSE DES DYNAMIQUES SPATIO-TEMPORELLES DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE

6.4.1. La durée de la coupure J-23

Plusieurs approches sont envisageables pour qualifier l'importance d'une coupure électrique, l'indicateur synthétique le plus utilisé est quantitatif : le « pic de clients coupés » ; pour Barcelone, il est estimé précisément à 323 337 foyers privés d'électricité dans les retours d'expérience (la presse annonçait plus de 350 000 foyers touchés au début de la crise). Un second indicateur synthétique se focalise davantage sur la dimension temporelle de la coupure et caractérise le temps de retour du système territorial à un approvisionnement électrique normal. La durée de la coupure est évidemment un facteur déterminant pour qualifier sa gravité, plus une panne électrique va durer, plus ses dommages directs et indirects sont susceptibles d'augmenter.

Par ailleurs, certains impacts indirects peuvent être déclenchés à retardement par la coupure électrique, par exemple lors de la coupure électrique dans le département du Var le 28 février 2001, l'alimentation en eau potable de certains territoires risquait d'être coupée au bout de 48 heures de coupure électrique du fait de l'autonomie limitée des générateurs électriques de secours dans les stations de pompage du réseau d'eau. Enfin, la durée de rupture d'approvisionnement électrique détermine largement son acceptabilité pour les populations, puisqu'une coupure d'une heure est bien plus tolérable et moins pénalisante qu'une coupure d'une semaine. Pour la panne électrique de Barcelone, le temps de retour à un état normal de l'approvisionnement électrique se situe aux alentours de 57 heures, ce qui témoigne d'une inertie assez forte des effets de la coupure. La restauration électrique s'avère irrégulière et progressive comme en témoigne la figure 61 qui croise des informations issues des retours

d'expérience avec des informations de la presse; de fait elle n'est pas un processus de changement d'état homogène et simultané dans l'espace.

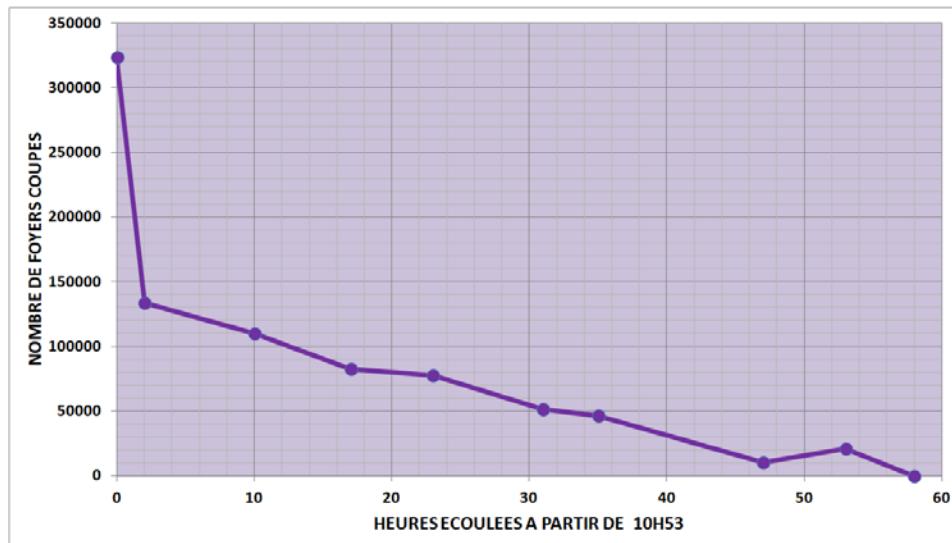


Figure 61 : Evolution du nombre de foyers coupés entre le pic et la fin de la coupure électrique.

La coupure électrique débute dans la matinée et touche 323 000 ménages, parmi lesquels 80 000 vont passer une nuit complète sans électricité et 10 000 deux nuits complètes. On peut distinguer deux rythmes dans la restauration électrique décrite dans la figure 16 :

- la première période correspond aux deux premières heures de la crise, le rythme de restauration est alors très rapide puisqu'on passe d'environ 320 000 à 130 000 foyers coupés entre 10h53 et 13h, soit près de 100 000 foyers restaurés par heure.
- A partir de là, le rythme moyen de restauration des foyers ralentit de manière très nette, puisqu'il se situe entre 2 000 et 3 000 foyers restaurés par heure.

Les informations sur le rétablissement progressif de chaque poste de transformation électrique sont les rares données quantitatives, non synthétiques, et disponibles publiquement dans les retours d'expériences sur le J-23. Dans la figure 62, nous avons synthétisé la dynamique de restauration des composantes du système électrique affectées par la panne. Contrairement à la figure 61, dans un souci de lisibilité, les intervalles temporels en abscisse ne sont pas représentés de manière proportionnelle et ne sont pas réguliers, ainsi le premier intervalle correspond à l'écoulement de quelques secondes alors que le dernier intervalle correspond à l'écoulement de 2 400 minutes.

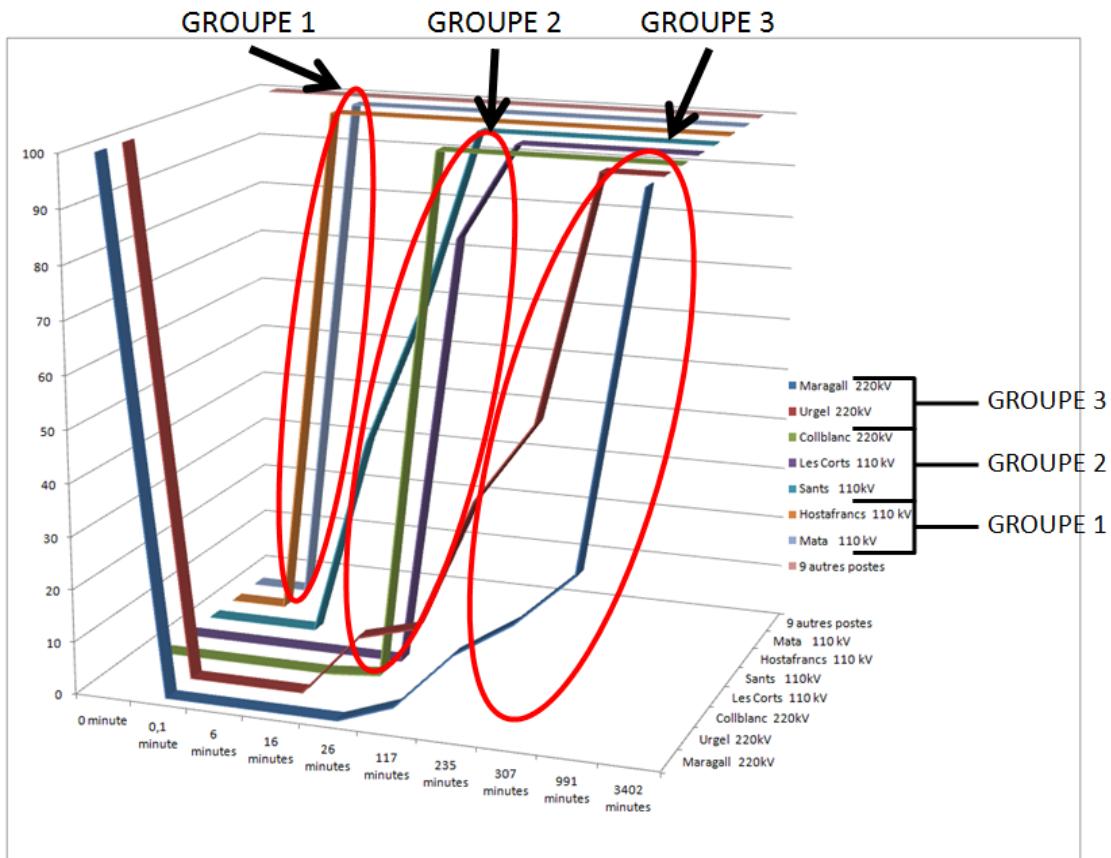
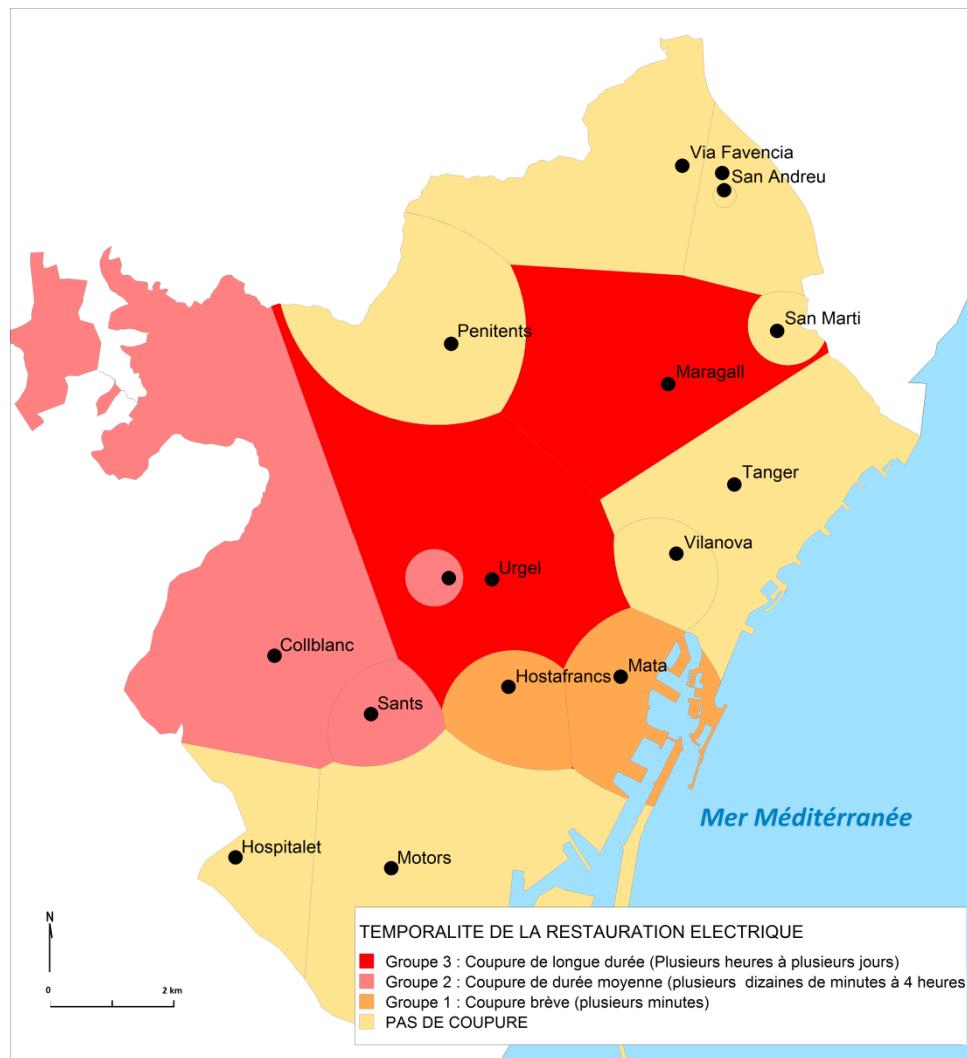


Figure 62 : Restauration progressive du fonctionnement des postes électriques au cours de la crise (0% indisponibilité totale - 100% état normal).

La dynamique de restauration des postes électriques impactés fait ressortir trois groupes de dynamiques temporelles (figure 62).

Le groupe 1 est composé des postes 110kV de Mata et Hostafrancs, se caractérise par un temps de coupure très bref, de l'ordre de quelques minutes. Le groupe 2, composé des postes 110kV Les Corts, Sants et du poste Collblanc 220kV, correspond à un temps de coupure allant de 1 à 4 heures. La restauration de ces postes débute après celle du groupe 1. Le poste de Collblanc à l'origine du déclenchement du système de risques appartient à ce groupe. Le groupe 3 se distingue le plus clairement, d'abord le déclenchement de la panne pour ce groupe est plus tardif et intervient quelques secondes après celui des autres postes. Mais c'est surtout la durée de l'indisponibilité des postes de 220 kv Urgel et Maragal qui en font un groupe atypique et à enjeu dans notre analyse, puisque les deux postes mettront plusieurs dizaines d'heures à retrouver un approvisionnement électrique normal. Par ailleurs, on peut souligner que le poste de Maragal dont le délai de restauration est le plus important, est le seul poste de transformation endommagé physiquement de manière importante dans le système de risques.



Carte 63 : Classification des bassins de dépendance électrique en fonction de la durée de la crise, d'après les groupes observés dans la figure 62.

6.4.2. La dynamique spatiale de la coupure J-23

La carte 54 renseigne sur la variabilité spatiale du temps de coupure dans les territoires barcelonais, en fonction de leur dépendance à un poste électrique. La zone centrale de la commune, dépendante des postes de Maragal et Urgel et qui correspond, entre autre, au district de l'Eixample, aux quartiers au sud du district de San Andréu et de Horta-Guinardo identifiés dans la section 2 comme des zones « certainement coupées », apparaît comme la zone plus durablement affectée par la panne électrique. Les zones correspondant au groupe 2 étaient également identifiées dans la catégorie « certainement coupée » dans la section 6.2 (carte 59 et 60) même si des discordances apparaissent, pour la commune d'Esplugues de Llobregat en particulier. Les sous-espaces de la catégorie 3, c'est-à-dire ceux qui n'ont été affectés que très brièvement par la coupure électrique, correspondent partiellement à la catégorie « en négatif » dans les résultats de la section 2 (coupure inférieure à 4 heures), toutefois la délimitation construite à partir des polygones de Voronoï semble surestimer la zone ayant subi une coupure très brève.

De manière à observer et comprendre plus finement la dynamique de diffusion et de résorption de la coupure électrique, une série chronologique de cartes de la coupure a été produite à partir des informations techniques sur chaque poste électrique et la méthode des tessellations de Voronoï pondérées de manière multiplicative. Dans un souci pratique, d'une carte à l'autre, les pas de temps ne sont pas tous identiques, en effet, si nous avions du représenter la restauration de la coupure (environ 60heures) avec la même précision temporelle que la dynamique de diffusion de la panne (quelques secondes), il nous aurait fallu produire des dizaines et des dizaines de pages de cartes identiques. La figure 63 présente la manière dont les cartes 64 « couvrent » la durée de la crise et propose une sorte de structuration en étapes de la chronologie des événements du J-23.

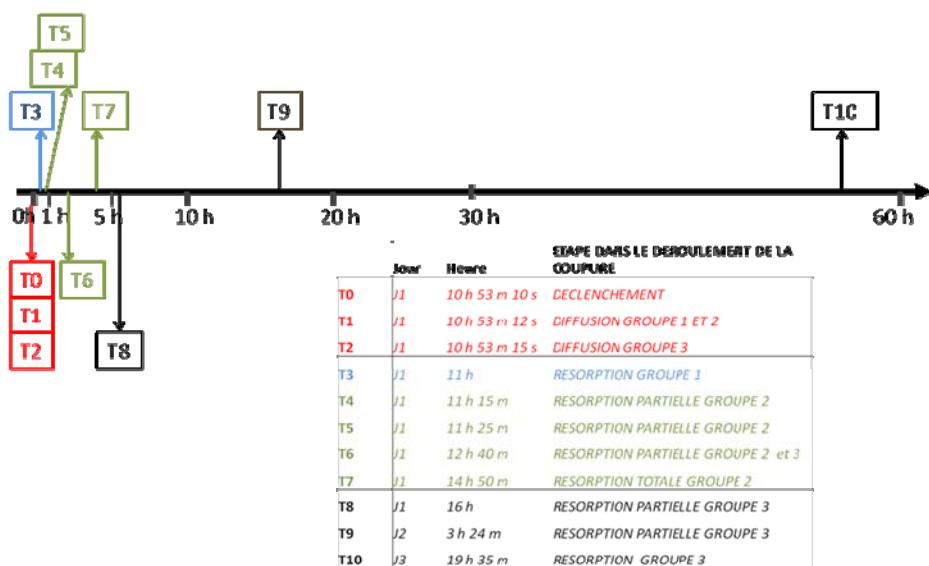
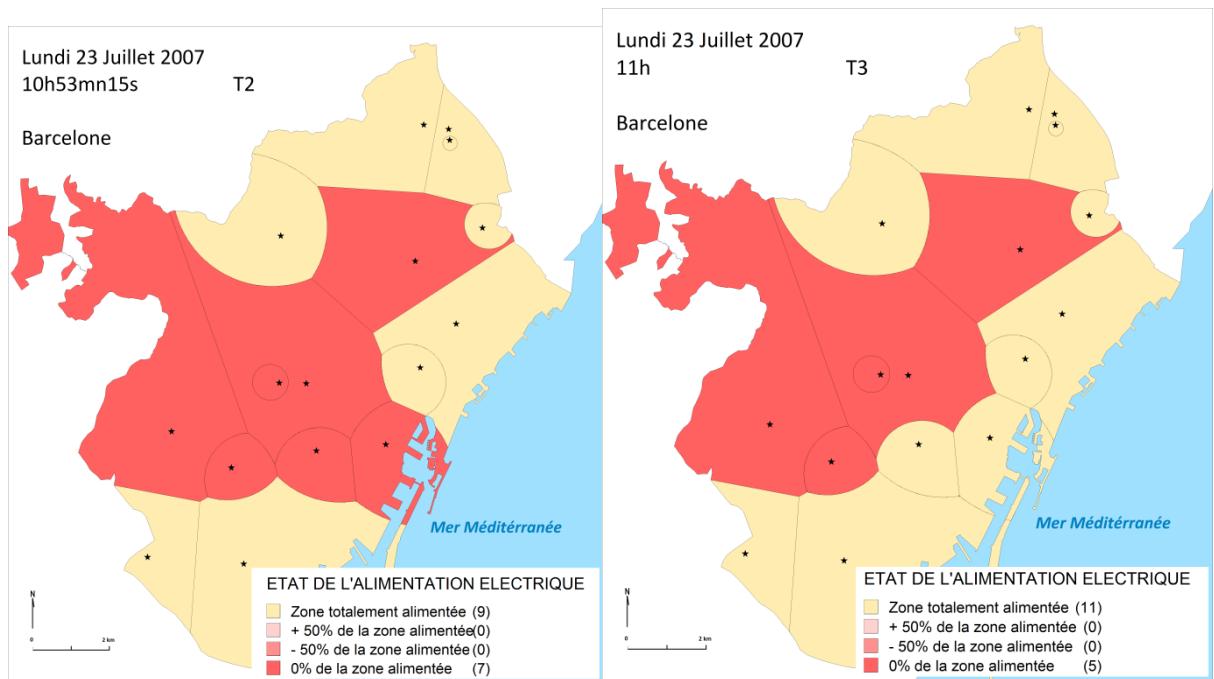
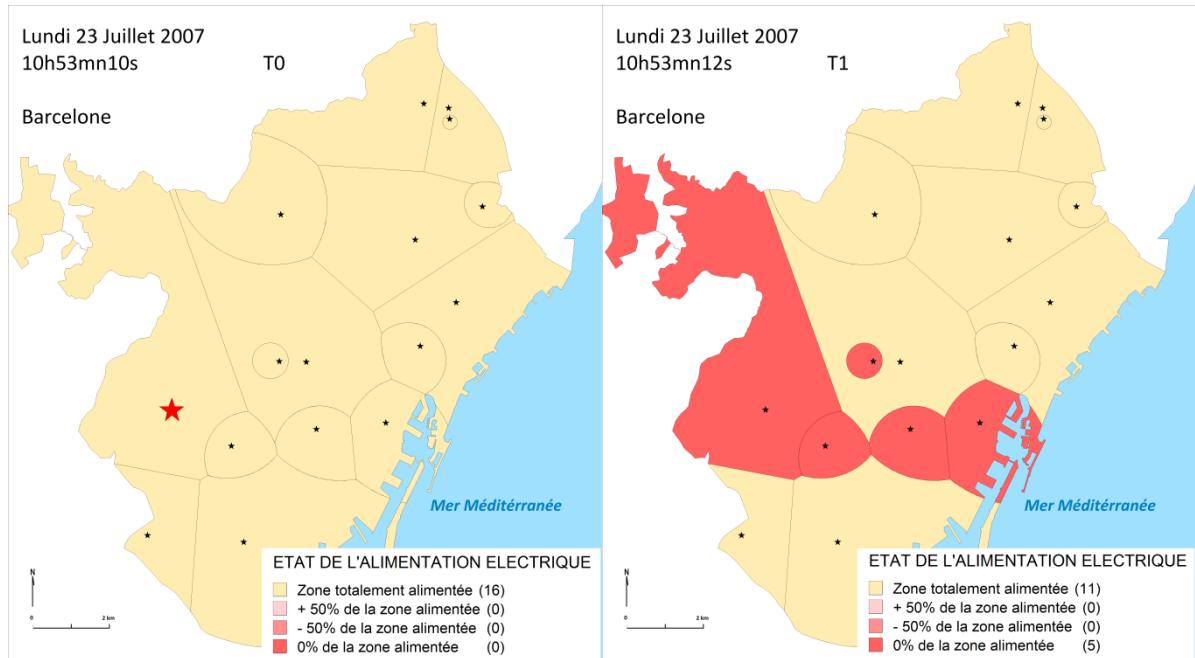
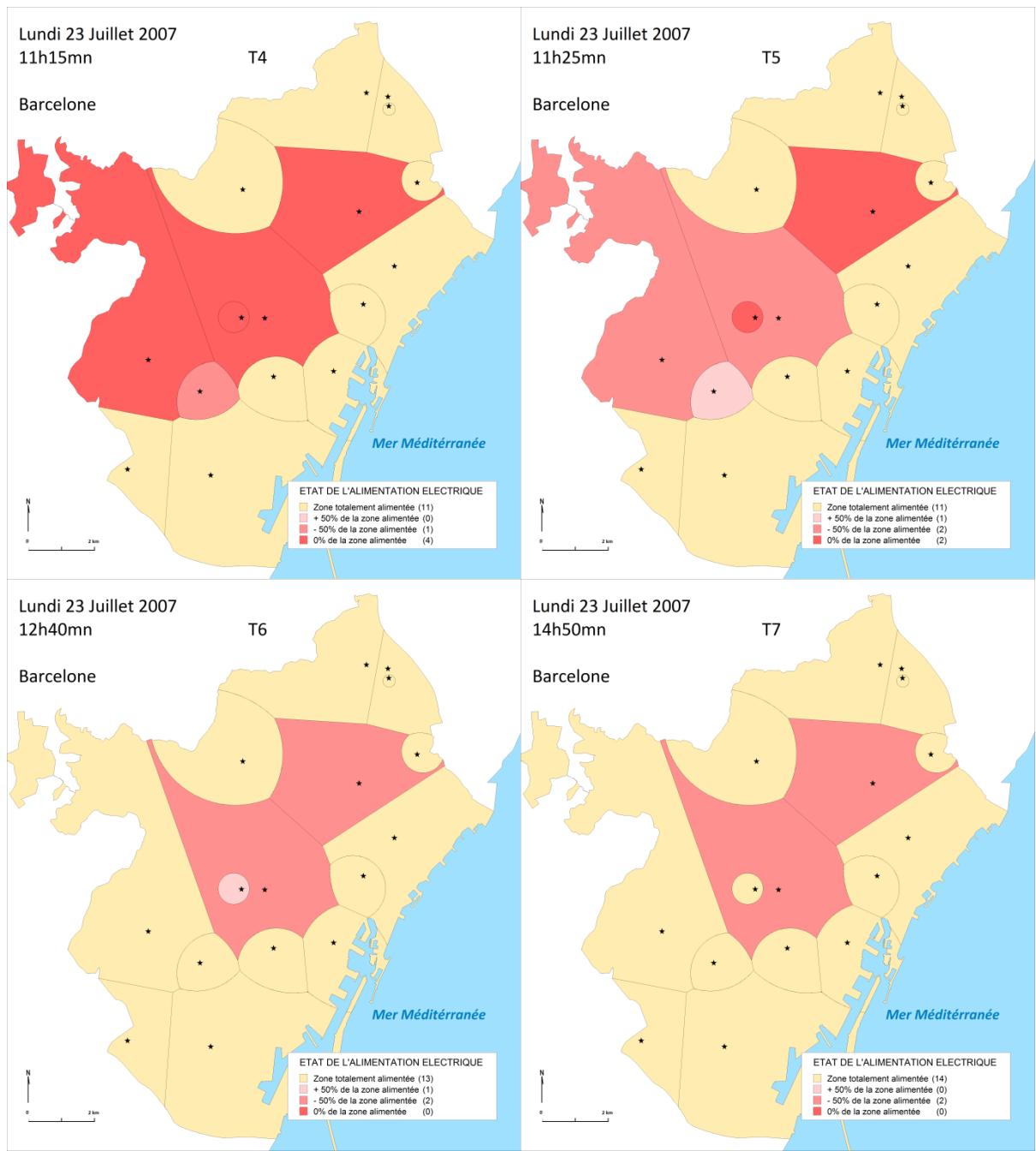
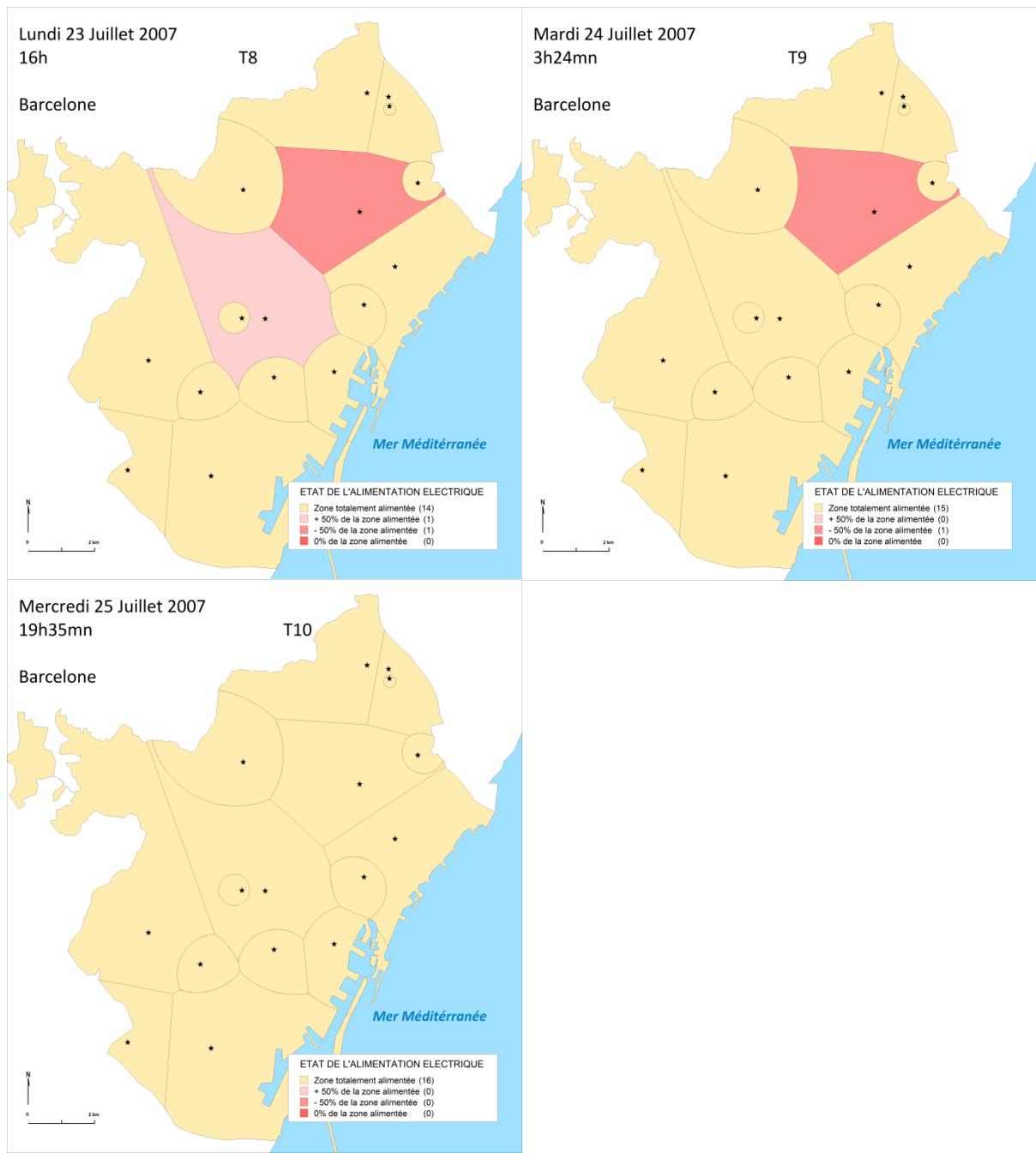


Figure 63 : Restauration progressive du fonctionnement des postes électriques au cours de la crise.







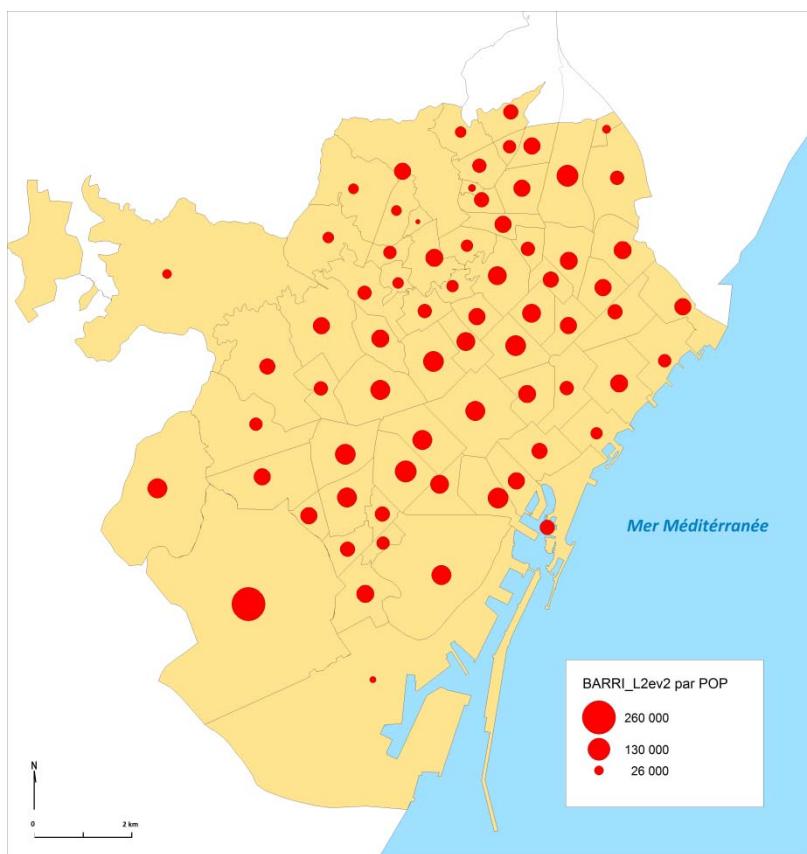
Carte 64 : Diffusion et résorption de la panne électrique dans les évènements du J-23 en fonction des 11 pas de temps définis dans la figure 18.

En nous appuyant sur l'évolution de l'approvisionnement électrique des postes de transformation (figure 62), le découpage des bassins de dépendance des postes et le recensement statistique des populations à l'échelle des quartiers de Barcelone, nous avons simulé l'évolution du nombre de foyers coupés que nous avons ensuite comparée aux données observées. La comparaison entre les données observées et les données simulées sur le nombre de foyers touchés va nous permettre d'évaluer la vraisemblance des découpages obtenus avec les tessellations de Voronoï standard et pondérées.

Il s'agit donc de valider la pertinence de la série chronologique de cartes précédentes, en mesurant la concordance de la dynamique morphologique (carte 64) avec l'évolution temporelle du nombre de personnes coupées décrites dans les retours d'expériences.

La méthode peut se décomposer en 4 étapes :

- Estimation des populations à l'échelle des 16 bassins de dépendance, sur la base du recensement des populations à l'échelle des 73 quartiers (carte 65) et d'une règle de répartition des populations proportionnellement à la surface.
- L'état de fonctionnement de chaque poste (exprimé en %) pour 15 points de temps de référence est ensuite croisé à la population de chaque bassin de dépendance obtenue en étape 1.
- Le passage du nombre d'individus au nombre de foyers est réalisé selon deux méthodes. Dans la méthode 1, le nombre de personnes par foyers est calculé de telle sorte que le nombre de foyers coupés au temps t_1 soit le même dans la simulation que dans la situation observée. Dans la méthode 2, on considère la statistique officielle selon laquelle les foyers barcelonais sont composés en moyenne de 2.9 personnes.
- Comparaison entre les données officielles et les résultats pour les méthodes 1 et 2 appliquées successivement aux bassins de dépendance obtenus à partir des polygones de Voronoï pondérés et les polygones de Voronoï standard.



Carte 65 : Nombre d'habitants par quartier à Barcelone en 2007 (données Ajuntament de Barcelona).

Ecart moyen entre données simulées et observées

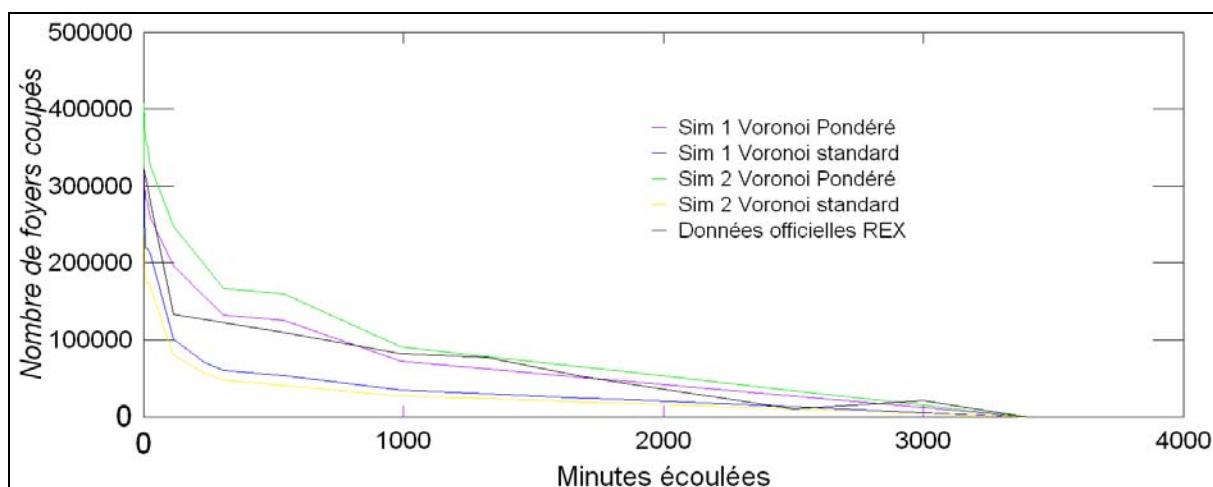
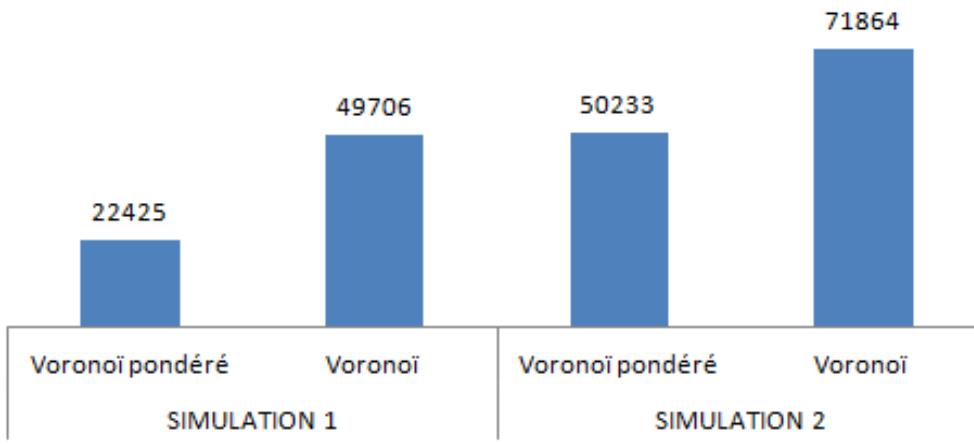


Figure 64 : Comparaison de l'évolution de la population coupée déclarée dans les rapports officiels avec les résultats de l'estimation à partir des polygones de Voronoï standard et pondérés.

La méthode 1 permet assez logiquement de minimiser les écarts moyens entre les données simulées et observées puisqu'elle utilise une donnée exacte comme point de départ de la simulation. Dans les deux cas, les simulations à partir des polygones de Voronoï pondérés obtiennent de meilleurs résultats que celles à partir des polygones de Voronoï standard. Avec la méthode 1 (courbe en violet), l'évolution du nombre de foyers coupés au cours des 53 heures de coupure est reproduite avec une erreur moyenne inférieure à 7% par rapport à la dynamique temporelle de référence, contre une erreur moyenne supérieure à 20% pour celles menées à partir des polygones de Voronoï standard (courbe en bleu) qui ont tendance à sous-estimer le nombre de foyers coupés.

Ce constat semble confirmer les résultats de l'analyse de variance de la partie 3.2 et les limites des polygones de Voronoï standard pour déterminer les bassins de dépendance des postes électriques. D'autre part, soulignons que la relative correspondance entre la dynamique temporelle observée et simulée ne permet pas de valider au sens strict la dynamique spatiale telle que proposée dans la carte 64 dans le sens où plusieurs dynamiques spatiales pourraient

permettre de reproduire avec plus ou moins d'exactitude l'évolution du nombre de clients coupés.

6.5. LES EFFETS INDIRECTS DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE

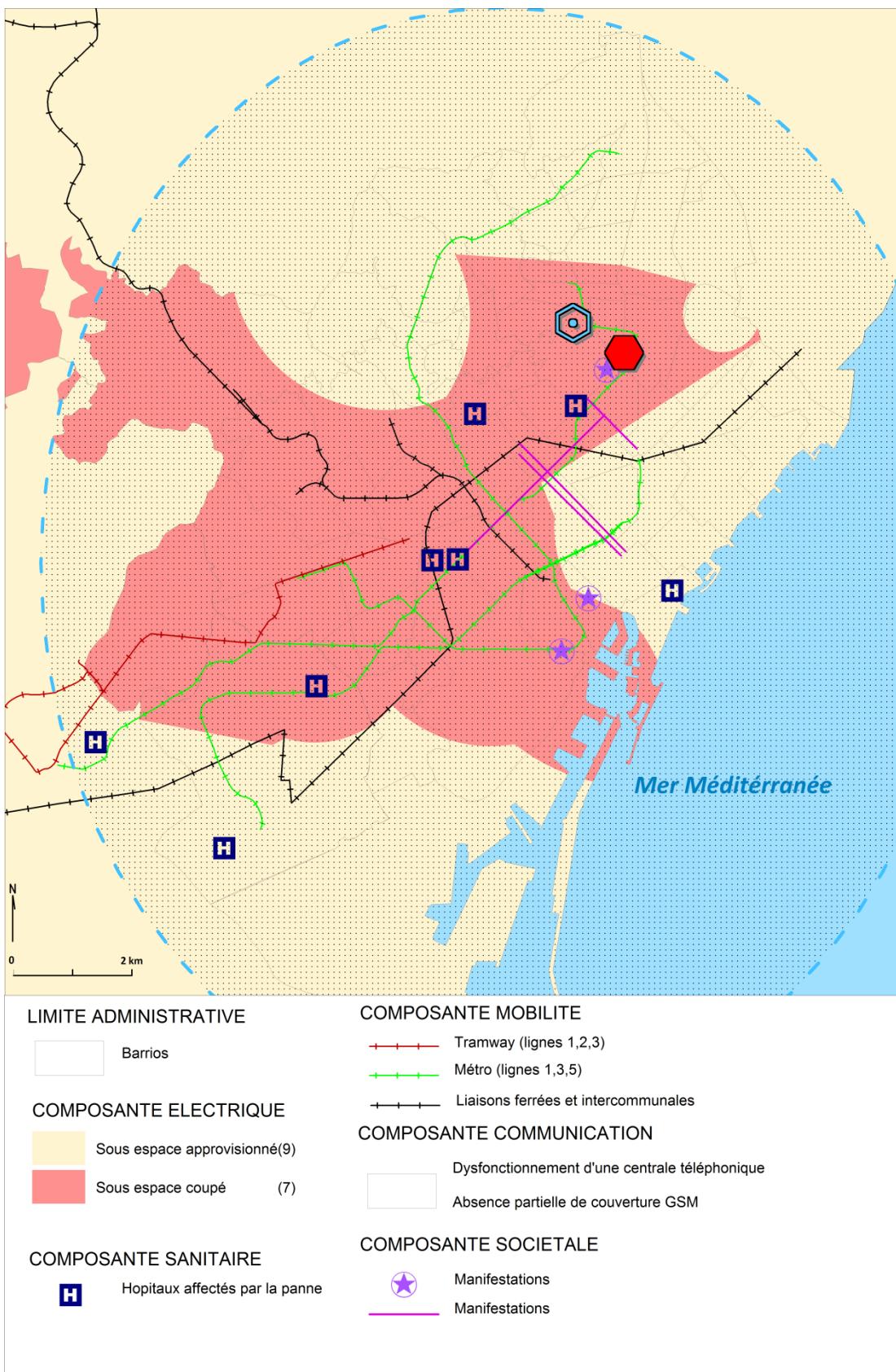
6.5.1. Les effets immédiats et l'interdépendance des réseaux

Notre approche des événements du J-23 consistait à nous demander dans un premier temps, quels sont les espaces qui n'ont plus disposé d'électricité à un moment ou un autre de la coupure. Ainsi, nous avons obtenu une première différenciation entre les espaces compris dans le périmètre de risque initial et ceux qui ne le sont pas.

Ensuite, nous avons introduit un second niveau de différenciation, en tentant de répondre à la question « combien de temps ces sous-espaces n'ont pas disposé d'énergie électrique ? ». Les territoires les plus durablement non approvisionnés en énergie électrique sont alors considérés comme les plus gravement affectés par la coupure, partant de l'hypothèse simple qu'une coupure électrique qui touche 1 000 personnes pendant 24 heures produit plus de dommages et de pertes que si elle touche 1 000 personnes pendant 10 minutes.

Dans cette partie, nous nuancerons ce point de vue en considérant que la gravité d'une coupure électrique dans un sous-espace n'est pas uniquement fonction de sa durée mais dépend aussi des impacts indirects qu'elle a provoqués, voire même qu'elle aurait pu provoquer. Les impacts indirects ont donc été séparés en trois catégories :

- Les effets immédiats de la coupure concernent principalement les dysfonctionnements avérés des autres réseaux imputables au non approvisionnement d'une composante en électricité. Tous ces effets ne sont pas nécessairement spatialisables.
- Les effets différés de la coupure portent sur les répliques de coupures électriques à Barcelone pendant plusieurs mois après les événements du 23 juillet 2007, signe d'une fragilisation du réseau électrique à moyen terme ; puis, sur le vaste programme de consolidation du réseau électrique planifié jusqu'en 2016.
- Les effets potentiels concernent des dommages non avérés. Notre question est de savoir, compte tenu de la dynamique spatio-temporelle de la coupure, quels sont les territoires où certains effets dominos particulièrement critiques auraient pu se réaliser.



Carte 66 : Les impacts immédiats de la coupure électrique sur les autres réseaux et sur la société.

Sans reprendre la description menée en 1.2 sur les impacts indirects, il faut préciser que la durée des effets dominos de la carte 77 est de l'ordre de 2 à 3 heures à partir du

déclenchement de la coupure électrique, le 23 juillet à 10h53. Les dysfonctionnements des feux de signalisations n'ont pu être cartographiés, on sait néanmoins qu'environ 60 % des feux tricolores de la ville étaient éteints juste après la coupure (touchant les artères urbaines principales), et qu'environ 20% l'étaient encore le mardi 24 en début de soirée.

La superposition du périmètre de coupure électrique avec la localisation des impacts indirects fait ressortir plusieurs éléments :

- Assez logiquement toutes les lignes ou points d'impacts indirects font partiellement partie du périmètre de coupure.
- les dysfonctionnements de plusieurs lignes de réseaux de transport collectif contribuent à l'extension de la surface de risque initial. De même pour le dysfonctionnement du réseau de téléphonie mobile, même si la zone affectée par la coupure des 200 postes relais n'est pas connue précisément.
- Le mode de diffusion des dommages dus à l'interdépendance des réseaux s'organise en plusieurs étapes : déclenchement de la panne à partir d'un nœud du réseau / diffusion à d'autres nœuds du réseau / zone coupée. Dans cette première zone d'impact, des nœuds d'un autre réseau dépendant du premier peuvent être affectés et produire une nouvelle composante et une nouvelle diffusion du système de risques.

Plusieurs précisions sont nécessaires pour expliquer l'apparition spontanée des « caceroladas » mentionnées dans la première sous-partie. En effet, au-delà de la durée importante de la coupure électrique, plusieurs témoignages soulignent que le manque d'information accessible au moment de son déroulement, a aggravé le mécontentement des populations. D'autre part, la panne a impliqué à la fois, le gestionnaire du réseau de transport électrique (REE) et celui du réseau de distribution (FECSA), qui au lieu d'adopter une stratégie de communication commune, ont débuté leurs communications de crise en se mettant mutuellement en accusation, ce qui a sans doute renforcé l'impression de désordre ambiant.

L'incendie du poste de transformation électrique de Maragal est le seul évènement de nature électrique sur la carte de synthèse. En effet, contrairement aux autres postes impliqués, ce dernier a subi un endommagement physique important qui explique le temps de retour à un état normal plus important que les autres. De plus, même si l'approvisionnement électrique sera rétabli au bout de 53 heures grâce aux nombreux générateurs de secours installés dans sa zone de dépendance, la restauration complète du poste après l'incendie ne sera achevée qu'en 2010, et l'approvisionnement électrique de Barcelone restera dans une situation précaire pendant plusieurs semaines après la crise. D'ailleurs, plusieurs coupures électriques, que nous pourrions qualifier de répliques, frapperont à nouveau le territoire barcelonais les semaines suivant la panne du J-23. La panne a en quelque sorte aggravé la fragilité du système électrique barcelonais dans le court terme.