ESTIMATION DU POTENTIEL D'ALERTABILITÉ SUR LES RÉSEAUX 4G (CB) OU 2G/3G/4G (LB-SMS) DANS DIFFÉRENTS TERRITOIRES FRANÇAIS

Rapport scientifique - Livrable 1.3a

Partenaires du projet

Avec le soutien financier de

Rédacteurs : Esteban BOPP, Johnny DOUVINET
(UMR ESPACE 7300 CNRS)

Participants : Mathieu COULON (ESPACE), Laura ROUSSEL (CHROME)

Novembre 2021

https://capalert.univ-avignon.fr/

Sommaire

Synthèse des résultats obtenus et recommandations 3

1. Introduction 4

2. L'espace : une variable sous-estimée..... 5

2.1 DES APPROCHES SOUVENT CENTRÉES SUR DES ASPECTS TECHNIQUES 5
2.2 DES ANALYSES SPATIALES LACUNAIRES 6
2.3 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE 7

3. Méthode et données mobilisées 8

3.1 ESTIMER LA PERFORMATION SPATIALE DU CB OU LB-SMS EN 3 ÉTAPES 8
3.2 DÉTECTER LES DIFFÉRENCES SPATIALES 10

4. Résultats obtenus dans différents territoires 12

4.1 À L'ÉCHELLE DE LA MÉTROPOLE FRANÇAISE 12
4.2 À DES ÉCHELLES LOCALES : L'EXEMPLE AUTOUR DE LA CU DE ROUEN 16
4.3 À L'ÉCHELLE DES RÉGIONS ULTRAPÉRIPHÉRIQUES : RÉUNION / MARTINIQUE 18
4.4 CONCLUSIONS INTERMÉDIAIRES 18

5. Éléments de discussions 21

5.1 QUELLE PERFORMANCE DURANT LA JOURNÉE ? 21
5.2 DES SIRÈNES À IMPLANTER DANS LES ZONES BLANCHES DE LA 4G ? 23
5.3 UNE SPATIALISATION POSSIBLE DE LA LOGIQUE MULTICANALE ? 24

6. Conclusions et perspectives 26

Liste des figures et des tableaux 27

Liste des références bibliographiques 28

Synthèse des résultats obtenus et recommandations

Cette étude a permis de mettre en avant plusieurs constats et de formuler plusieurs recommandations, qu'il faut considérer à l'horizon des JOP 2024, pour améliorer la diffusion de l'alerte à la population en France. Aucune hiérarchie n'est retenue dans les propositions ci-dessous.

CONSTATS	RECOMMANDATIONS
L'alertabilité sur les réseaux 2G/3G/4G permettraient d'alerter 94% des résidents en métropole, alors qu'une alerte diffusée sur un réseau 4G ne couvrirait que 81%.	**Connaître ces écarts et cette alertabilité permet d'anticiper la portée des outils qui utilisent tel ou tel réseau.**
Si les taux estimés sont homogènes à l'échelle des départements, des écarts sont néanmoins détectés à une échelle fine, et une diagonale de faible performance apparaît, en lien avec la diagonale du vide.	**Il faut donc définir des stratégies d'alerte en tenant compte de ces écarts initiaux (d'autant que le potentiel technique et maximisé).**
A l'avenir, dans un travail complémentaire, il faudra changer de focale : il convient de connaître les risques et la temporalité des dangers à l'échelle des territoires, pour savoir ensuite si le CB ou les LB-SMS sont appropriés ou non.	**Partir des territoires et non de la portée théorique des territoires : voici l'enjeu et le défis à relever à la suite de ce livrable.**
Afin d'améliorer les taux d'alertabilité par CB, il faut connaître le parc des smartphones compatibles du point de vue technologique. Ces données sont détenues en partie par les différents opérateurs téléphoniques.	**Le CCED a demandé ces données aux différents opérateurs, et un travail plus précis sera réalisé en 2022 avec le CCED.**

1. Introduction

Cap-4-MultiCan'Alert est un projet de développement expérimental s'inscrivant dans le cadre des Jeux Olympiques et Paralympiques de 2024. Il a pour but d'aboutir au développement d'une solution d'alerte multicanale innovante, qui combinera différents canaux de diffusion, adaptés aux contextes réglementaire et technologique se profilant en France, et qui intègrera les besoins des utilisateurs finaux et les réactions à attendre des populations. Le consortium, inédit, est composé de 2 industriels (ATRISC et GEDICOM-F24) et 2 laboratoires de recherche publics (ESPACE et CHROME).

Ce projet est né pour répondre à deux lacunes actuelles :

1) **le manque d'efficacité et de clarté dans les contenus des outils d'alerte en France** (un signal sonore pour les sirènes du réseau SAIP, un message vocal / texte pour les automates d'appel d'alerte, un message texte pour les SMS géolocalisés et le Cell Broadcast, etc.), alors qu'ils sont censés alerter et informer la population en cas de dangers ou de menaces susceptibles de porter atteinte à l'intégrité physique des biens ou des personnes

2) **l'absence d'une réelle réactivité des populations,** qui préfèrent poursuivre leurs activités ou qui ne perçoivent pas bien les risques alors que l'alerte doit induire des mesures réflexes de sauvegarde.

Il vient également répondre à une demande sociétale et institutionnelle (appel à projet ANR) : l'alerte doit être à la hauteur des enjeux dans le contexte des événements d'ampleur qui seront bientôt accueillis par la France, tels que la Coupe du Monde de Rugby en 2023 ou les JO de Paris en 2024.

Le présent rapport repose en grande partie sur les travaux de thèse d'Esteban Bopp (2021), intitulée « Évaluation et spatialisation du potentiel offert par les moyens d'alerte centrés sur la localisation des individus. Expérimentation à différentes échelles en France ». Nous nous intéressons ici à deux systèmes d'alerte géolocalisée : **les SMS géolocalisés (LB-SMS**, pour *Location-Based Short Message Service*) et **la diffusion cellulaire (CB, pour *Cell Broadcast*).** Ces technologies permettent toutes les deux la diffusion de messages textuels d'alerte sur les téléphones des individus, localisés en temps réel, mais leurs modes de fonctionnement diffèrent. Le Cell Broadcast consiste à envoyer une notification sur les smartphones, et cette diffusion, qui nécessitera d'avoir accès à la 4G et un téléphone compatible en France, s'achèvera en quelques secondes, quelle que soit la taille de la population alertée. Le LB-SMS consiste à envoyer un SMS géolocalisé, sans distinction avec d'autres SMS reçus quotidiennement, et tous les téléphones sont compatibles, même sur la 2G. L'effet de congestion sur les réseaux de télécommunications peut toutefois allonger le temps de diffusion et les LB-SMS ne sont donc pas recommandés en cas d'urgence massive et immédiate (cf. le livrable 1.2.a pour plus de détails sur les modes de fonctionnement, avantages et limites de ces technologies).

L'étude qui suit a pour objectif d'estimer quelle part de la population française (Métropole et territoires d'Outre-mer) serait effectivement alertée en cas de diffusion via l'un ou l'autre de ces deux LBAS (*Location-Based Alerting System*, moyens d'alerte centrés sur la localisation des individus). Pour cela, trois variables sont définies et calculées : le taux de connectivité, le taux d'équipement, et *in fine*, le **taux d'alertabilité** (partie 3). Les estimations chiffrées et cartographiées sont présentées à différentes échelles (partie 4) puis nous apportons quelques éléments de discussion (partie 5).

2. L'espace : une variable sous-estimée…

Le terme de performance est généralement employé pour caractériser l'efficacité d'un système d'alerte et observer le taux de pénétration d'un moyen d'alerte au sein d'une population (Badoux et al., 2009; Bricker et al., 2017; Gonzalez et al., 2016). Le terme de performance spatiale nécessite d'aller plus loin, en évaluant le taux d'individus situés dans des espaces où ces moyens peuvent fonctionner, et le taux d'individus en capacité de recevoir une alerte (i.e. équipé d'un terminal mobile concernant les LBAS). Afin d'estimer ce potentiel, nous avons mis en place un nouveau protocole d'évaluation pour apporter des réponses à plusieurs questions : combien d'individus seraient susceptibles d'être alertés par un LBAS en France (avec l'hypothèse que toutes les infrastructures techniques seraient en place) ? Est-ce que la performance varie selon le LBAS et/ou selon les territoires ? Une alerte par LBAS serait-elle spatialement homogène entre les 34 842 communes du territoire métropolitain ? Ou constate-t-on, comme pour les sirènes, des « trous dans la raquette », c'est-à-dire des secteurs géographiques (communes ou groupes de communes) où les LBAS auraient une performance limitée ?

2.1 Des approches souvent centrées sur des aspects techniques

L'analyse de la performance des LBAS a été initiée dans le milieu des années 2000 aux Pays-Bas par un groupe de quatre chercheurs de l'université de Delft : Ben Ale, Helena Jagtman, Simone Sillem et Erik Wiersma. Leurs travaux portent sur une série de tests sur différentes communes des Pays-Bas. Dès 2004, Sillem et al., (2004) ont testé la performance du LB-SMS sur la commune de Vlaardingen (72 000 hab. environ). Wiersma et al (2008) et Jagtman (2010) ont ensuite évalué la performance du CB à travers des tests englobant plusieurs communes. Jagtman (2010) a réalisé de son côté des essais sur un peu plus de 11 000 participants et il a observé les taux de réussite (nombre d'individu ayant effectivement reçu le message et cause des échecs de réception). Sillem et Wiersma (2006) ont proposé une approche comparative de la performance du CBC et du LB-SMS aux Pays-Bas. Ces travaux se sont ainsi penchés sur l'évaluation technique et sociale de la performance du CBC et du LB-SMS mais sans chercher à analyser les résultats d'un point de vue spatial.

A partir des années 2010, l'évaluation de la performance des LBAS se développe. Outre les méthodes techniques d'implémentation des systèmes (Azid et al., 2015 ; Cioca et al., 2008 ; Kuantama et al., 2012), les méthodes d'évaluation comparatives (CB vs. LB-SMS) se généralisent mais restent pour beaucoup cantonnées à définir les « apport et limites », sans réelle méthode quantitative (Bean, 2019; Faggiani et al., 2014; Gu and Peng, 2010; Mahmud et al., 2012; Udu, 2009). Certains travaux plus quantitatifs ont permis néanmoins d'identifier plusieurs facteurs de performance des LBAS. Gonzales et al. (2016) ont analysé la performance de LBAS à l'aide d'un SIG en estimant le nombre d'individu alertable face à un risque de tornade aux Etats-Unis. Ce travail a été réalisé à l'échelle des territoires touchés par un « tornado outbreak » en 2011 en Alabama. Parker et al. (2015) a simulé la performance des LBAS (via un Système Multi-Agent, SMA) à l'échelle d'un territoire fictif. Marckwart et al. (2019) ont utilisé la réalité virtuelle pour tester la performance d'alertes par téléphonie mobile sur un petit groupe d'individus. Samarajiva et Waidyanatha (2009) ont testé la diffusion d'alertes par LB-SMS dans 32 villages sri lankais affectés par le tsunami de 2004.

Les travaux sur les applications mobiles d'alerte sont devenus foisonnants ensuite. En revanche, ils restent centrés sur les caractéristiques techniques des applications sans chercher à évaluer le nombre potentiel d'individus atteignables au moyen de cette solution (Bopp et al., 2019).

En parallèle, plusieurs États équipés d'un LBAS commencent à rendre publiques les données issues des tests. Dès 2005, les Pays-Bas ont publié les résultats des tests du CBC à large échelle. La Belgique et l'Australie ont plusieurs fois testé (et même utilisé) leur système d'alerte par LB-SMS. En 2020, plusieurs provinces canadiennes ont testé le CB. Les USA ont également procédé à des tests de diffusion du CB, y compris à l'échelle nationale (l'outil a ainsi été testé sur 328,2 millions d'individus).

En France, l'étude de la performance des moyens d'alerte s'est jusqu'à présent limitée à des travaux qualitatifs sur des moyens d'alerte traditionnels (les sirènes notamment). Douvinet (2020) et Douvinet et al. (2019) ont démontré la couverture partielle des sirènes en France et leur inefficacité à alerter de façon équivoque la totalité des secteurs géographiques. Le cabinet Deloitte (Deloitte, 2014) a analysé de manière comparative différents moyens d'alerte sur des aspects techniques, de compréhension des messages, de capacité à atteindre des individus, etc. sans toutefois proposer des mesures précises ou simulées de leurs indicateurs. Des projets sont d'ailleurs en cours pour commencer à tester le CB et/ou le LB-SMS sur des portions du territoire français mais les résultats ne sont pas encore connus.

2.2 Des analyses spatiales lacunaires

Le travail de bibliographie réalisé à l'échelle internationale sur la performance des LBAS apporte deux enseignements : 1) l'évaluation de la performance des LBAS est un domaine d'étude qui s'est développé dès le début des années 2000, dans les pays qui sont aujourd'hui équipés d'un tel système (Etats-Unis, Australie et Pays-Bas notamment), mais pas en France, où aucune évaluation de ces solutions n'a encore été publiée à ce jour (Bopp and Douvinet, 2020) ; 2) les tests sont souvent réalisés dans des communes, dans des contextes urbains (ce qui peut expliquer les résultats satisfaisants des LBAS), ou en indiquant uniquement les taux de pénétration des technologies aux échelles nationale. In fine, ces résultats se focalisent sur un nombre de terminaux (et non d'individus) potentiellement atteints ou non, sans savoir si des logiques spatiales ou les effets des configurations territoriales émergent.

Début 2020, il était donc impossible de connaître le potentiel des LBAS à travers les échelles ni de savoir si des transferts ou des jeux d'échelles sont en jeu (**Figure 1**). La mesure de la « performance technique » (nombre de terminaux atteints) prédomine ainsi au détriment de la « performance spatiale » (nombre, taux et répartition spatiale des individu) et ce constat soulève de nombreuses questions : existe-t-il des inégalités spatiales, aux échelles fines et/ou aux échelles larges, quand on évoque la performance des LBAS ? Les « zones d'ombre » ou les « zones blanches », quand elles existent, sont-elles disparates ou regroupées ? Et en ayant connaissance de ces espaces, est-on en mesure d'accompagner les autorités dans leur prise de décision, ou en capacité de proposer des solutions palliatives ?

L'objectif de cette étude était donc de mettre en œuvre un protocole robuste pour estimer le potentiel de performance spatiale des LBAS sur l'intégralité de la France métropolitaine, en estimant un potentiel d'alertabilité (i.e. le taux d'individu théoriquement en situation d'être alertés) à l'échelle communale. L'idée est d'estimer la performance de trois LBAS (CBC, LB-SMS et notification push) sans prendre en compte les éventuels soucis techniques (susceptibles d'arriver lors d'envoie des alertes), ni l'état du déploiement actuel des infrastructures (les opérateurs auront probablement déployé la technologie CBC en métropole à partir de fin 2021), ni les questions financières (le coût du déploiement du CBC est par exemple supérieur à celui du LB-SMS) ni d'acceptabilité sociale (abordée dans le chapitre 6), ni même le temps requis pour la formation des décisionnaires. Nous définissons **la performance spatiale** d'un moyen d'alerte comme sa capacité à atteindre de façon homogène un nombre d'individus vivant sur un territoire, par rapport à une population initiale estimée.

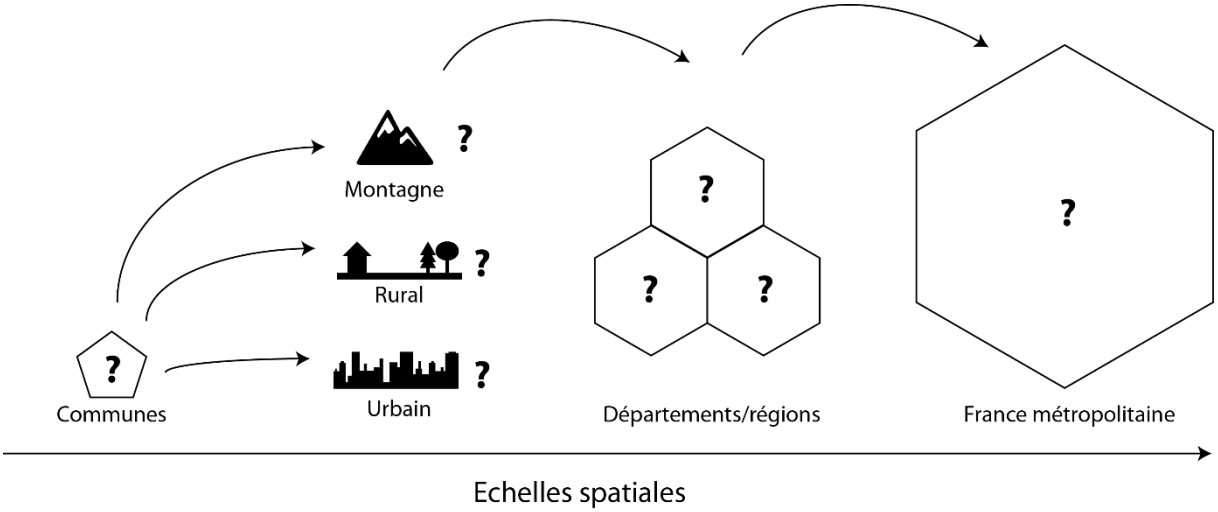

Figure 1. Des différentiels de performance des LBAS à travers les échelles en France ?

Commentaires de l'équipe projet : Le CB ou LB-SMS sont les 2 technologies sur lesquelles l'équipe s'est focalisé, en lien avec le livrable 1.2a. Le potentiel d'alertabilité par application mobile a aussi été estimé, mais les résultats ne sont pas présentés ici (voir la thèse d'E. Bopp pour plus de détails).

2.3 Objectifs et hypothèses de recherche

Notre étude a cherché à répondre à 7 hypothèses de recherche, résumées de la façon suivante :

- **H1 :** plus de 75% de la population française (métropole + outre-mer) est alertable par LBAS (le seuil de 75% étant considéré ici comme une valeur arbitraire, à défaut d'avoir des données plus précises ; les Pays-Bas utilisent ce seuil pour considérer un système d'alerte efficace) ;
- **H2** : Les LBAS sont des moyens très égalitaires entre les communes (ce qui induit un indice de différenciation spatiale Ig<0,25) ;
- **H3 :** Les taux d'alertabilité des LBAS des communes proches sont d'avantage similaire que ceux des communes éloignées (Im > 0,25) ;
- **H4 :** la performance des LBAS augmente lorsque le nombre d'habitants augmente ;
- **H5 :** plus l'aire urbaine est grande, plus les LBAS sont performants ;
- **H6** : La performance des LBAS décline avec l'augmentation du taux de couverture forestière à l'échelle communale.
- **H7** : La performance des LBAS décline lorsque la dispersion spatiale des habitats augmente à l'échelle communale.

Commentaires de l'équipe projet : Alors que la France s'apprête à déployer le CBC et le LB-SMS, aucune étude n'a été mené sur leur performance spatiale potentielle. Les méthodes d'évaluation se sont souvent fondées sur des tests, sans tenir compte des différentiels spatiaux à travers les échelles, alors qu'un certain nombre de questions (converties ici en hypothèses) restent sans réponses.

3. Méthode et données mobilisées

La méthode développée s'appuie sur différents traitements réalisés sous un SIG (Système d'Information Géographique). Elle repose sur les données disponibles gratuitement sur les individus et la localisation de leur lieu de résidence (ce qui induit un premier biais : on se fonde sur les résidences, et non sur la localisation en temps réel des individus). Seuls les individus âgés de 18 ans et plus sont pris en compte. On considère que les individus âgés de moins de 18 ans ne sont pas en capacité d'interpréter une alerte et de mettre d'eux-mêmes en pratique des mesures de sauvegarde.

Les données sont disponibles gratuitement sur le site internet du projet. Un « *data paper* » est en cours d'étude. Les données ont également été livrés gratuitement au CCED fin novembre 2021.

3.1 Estimer la performation spatiale du CB ou LB-SMS en 3 étapes

Le Taux de Connectivité (TC)

TC correspond au taux d'individus situés dans la couverture d'un réseau de télécommunication sur un territoire donné. Les données carroyées à 1km de l'INSEE (2015) ont été utilisées sur la métropole pour localiser les individus. Une couverture 2G, 3G ou 4G est nécessaire pour que les LB-SMS fonctionnent, tandis que le réseau 4G a uniquement été retenu pour les estimations du CB. Seules les zones couvertes et mises en ligne par les principaux opérateurs français (Bouygues©, SFR©, Orange©, Free©) ont été sélectionnées (outil d'intersection sur SIG), en métropole, car il n'est pas possible de connaître le nom de l'opérateur pour chaque personne à une échelle précise.

Ce taux de connectivité est obtenu comme suit :

$$TC = \frac{NC}{N} = \frac{(N2G \ \cup \ N3G \ \cup N4G)}{N}$$

Avec N, le nombre d'individus âgés de 18 ans et plus sur un territoire ;
NC, l'estimation du nombre d'individus connectés ;
N2G, N3G, N4G, le nombre d'individus vivant dans une zone couverte par la 2G, 3G ou 4G.

Cette équation est valable pour le CB et le LB-SMS, et ce taux a été estimé d'après les données publiées par le CREDOC (2019 ; **Tableau 1**).

Les N2G, N3G et N4G sont obtenus ainsi :

$$NxG = NxGa \cap NxGb \cap NxGc \cap NxGd$$

Avec xG *le type de réseau (2G, 3G, 4G) ;*
a, b, c et d, les quatre opérateurs téléphoniques français.

L'approche est imparfaite à cause de l'évolution rapide des données et du fait que les individus sont ici « fixés » à leur domicile. Les résultats seraient donc plus réalistes dans un scénario où les individus sont chez eux (pendant la nuit).

	Catégories d'âge						Nombre d'habitants			
	18-25	25-39	40-54	55-64	65-79	80+	>2000	2000-20k	20k-100k	>100k
Connect. Wifi	82,0	72,0	61,0	48,5	22,6	16,0	48,0	49,0	47,0	59,0

Tableau 1. Taux d'individus connectant leur smartphone au Wifi (d'après le CREDOC (2019))

Le Taux d'Équipement (TE)

TE correspond au taux d'individus équipés en téléphone mobile ou en smartphone sur un territoire donné. Selon le rapport du CREDOC[1] (2019), la probabilité qu'un individu possède un téléphone mobile ou un smartphone dépend de l'âge des individus (Tableau 2). Les données carroyées de l'INSEE précédemment utilisées renseignent sur le nombre d'individus et sur leur âge dans des carreaux d'1km². L'information est extrapolée si le nombre d'individus dans le carreau est inférieur à 11 (afin de protéger les identités des individus). Le TE est calculé comme suit :

$$TE = \frac{NEage}{N} = (\sum_{x=1}^{6} \left(\frac{Nx * NTEx}{100}\right))/N$$

Avec N, le nombre d'individus âgés de 18 ans et plus sur un territoire ;
NEage, l'estimation du nombre d'individu équipés selon l'âge des individus ;
x, la classe d'âge des individus,
NTE, le taux d'équipement national des individus (donné dans le Tableau 2).

	Catégories d'âge					
	18-24	25-39	40-54	55-64	65-79	80+
Smartphone	98,0	92,0	81,0	68,0	41,6	35,0
Tél. Mobile	100,0	98,0	96,0	94,0	82,0	82,0

Tableau 2. Taux de possession de smartphone et de téléphone mobile (%) selon l'âge des individus et le nombre d'habitant de leur commune de résidence (d'après les données du CREDOC (2018))

Le Taux d'Alertabilité (TA)

Le taux d'Alertabilité (TA) est obtenu en combinant TC avec TE de la manière suivante :

$$AR = \frac{\left(\frac{NEage}{N} * \frac{NC}{N}\right)}{100}$$

Avec N, le nombre d'individus âgés de 18 ans et plus sur un territoire ;
NEage, l'estimation du nombre d'individu équipés selon l'âge des individus ;
NC, l'estimation du nombre d'individus connectés.

[1] Le « Baromètre du numérique » est une enquête réalisée annuellement sur un échantillon représentatif de la population française par le Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de vie (CREDOC).

La **Figure 2** présente l'ensemble de la méthode en prenant à titre d'exemple la commune de Barrême (05) où sont recensés 436 habitants (2015). Le CB et le LB-SMS n'ont pas le même taux d'alertabilité car ces deux solutions ne fonctionnent pas sur les mêmes réseaux. Une faible corrélation positive entre le taux de connectivité et le taux d'équipement est révélé pour chaque solution.

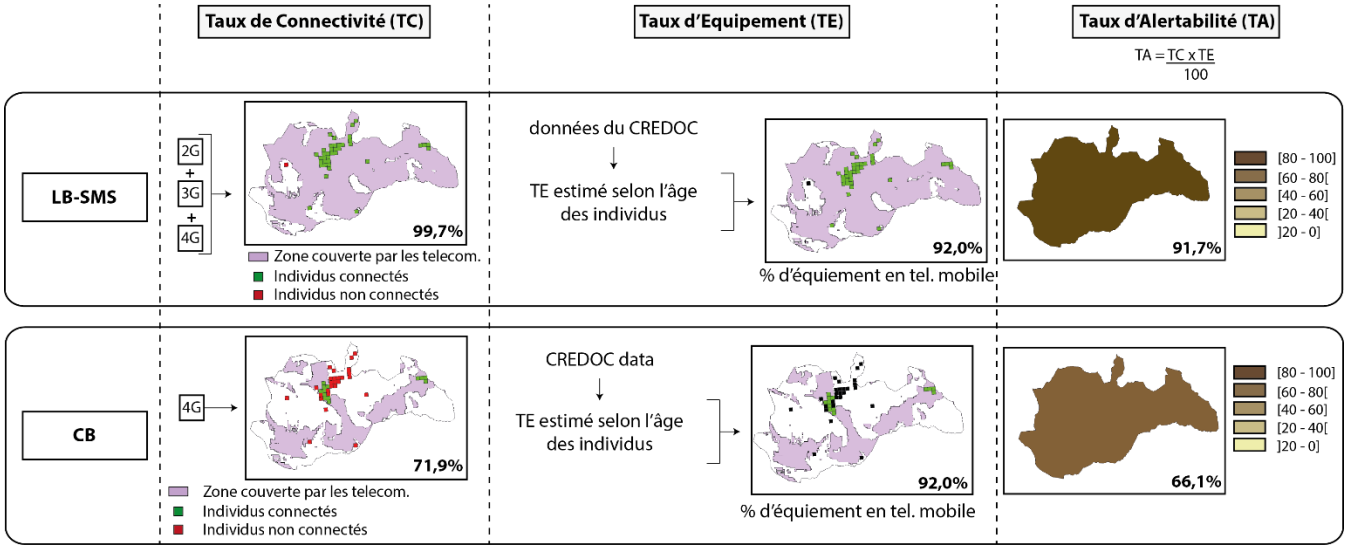

Figure 2. Méthode employée pour calculer le taux d'alertabilité par CB et par LB-SMS des individus résidents (exemple pour la commune de Barrême, Alpes-de-Haute-Provence, 436 habitants).

3.2 Détecter les différences spatiales

L'homogénéité spatiale de la performance des LBAS a été questionnée en utilisant 2 indices :

1) **l'indice de Gini** (Ig), qui révèle le niveau d'inégalité dans la distribution statistique des taux d'alertabilité. Cet indice varie entre la valeur 0, ce qui signifie que la distribution est parfaitement égale (dimension de justice spatiale), et 1, qui signifie une distribution inégale avec des « injustices spatiales » élevées ;

2) **l'indice de Moran** (Im) (Pumain and Saint-Julien, 2010), qui détecte des autocorrélations spatiales et de mesurer l'intensité des relations entre proximité et similarité. Si l'indice de Moran est proche de 1, cela indique que les communes voisines ont des taux d'alertabilité similaires par rapport à des communes plus éloignés. Au contraire, si l'indice de Moran est égal à -1, cela signifie que les communes proches ont tendance à avoir des taux d'alertabilité différents les uns des autres par rapport aux communes plus éloignées. L'indice de Moran est calculé à l'échelle de la France, mais aussi pour chacune des communes) : on parle alors d'indicateurs locaux d'arrangement spatial (LISA *pour Local Indicators of Spatial Association*). La cartographie des indices locaux de Moran spatialise les communes où les taux d'alertabilité entre communes voisines tendent à être similaires et ceux où ils tendent à être différents.

Une cartographie des points chauds et froids a été réalisée pour identifier les zones de forte ou de plus faible performance. Cette étape a été réalisée *via* un l'outil « Cartographie de points chauds » sous SIG utilisant la statistique spatiale « Getis-Ord » (Ord and Getis, 2010). La performance des communes est

alors comparée à celle des communes voisines, ce qui lui permet de localiser les points chauds (bonne performance) et froids (faible performance) statistiquement significatifs.

Des travaux antérieurs ont montré que les technologies de communication étaient moins efficaces dans les zones rurales (Chilimo, 2008; Preston et al., 2007) même si elles contribuent à la revitalisation de ces zones (Brachotte, 2011). Quatre classes de communes ont été retenues en fonction de la typologie en Aire Urbaine (AU), définie pour rappel par l'INSEE comme : « *un ensemble de communes d'un seul tenant et sans enclaves, constitué par un pôle urbain de plus de 10 000 emplois, et par des communes rurales ou unités urbaines dont au moins 40% de la population résidente ayant un emploi travaille dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci* ». En raison de la forme non paramétrique des résultats (vérifiés à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov) et de l'hétéro-scédasticité des données (ce qui sous-entend des variances non homogènes), une analyse de la variance par transformation de rangs alignés (Wobbrock et al., 2011) a été utilisée pour comparer les résultats dans les zones urbaines.

Les résultats obtenus pour les communes situées en territoire montagneux ou selon la part de la superficie couverte par des forêts permet de répondre aux hypothèses 6 et 7. Le classement des communes en zone de montagne dépend de critères établis par l'État français. Il s'agit de communes limitées dans leur développement par la topographie ou des conditions d'altitude difficiles. Le zonage des forêts est tiré de la base de données gouvernementale « Corine Land Cover » qui précise l'utilisation des terres à l'échelle nationale. Pour répondre à l'hypothèse 8, la densité dans les zones habitées a été calculée dans chaque commune, en divisant la somme des habitants par la somme des surfaces des cellules habitées de l'INSEE : il s'agit ainsi d'une densité de population des carrés habités.

Les indices de concentration ou de centralisation (Duncan and Duncan, 1955) n'ont pas été utilisés car il n'est pas possible de définir rigoureusement la taille de la plus petite zone dans laquelle la population pourrait vivre à l'échelle des 34 841 communes de la zone d'étude. Une analyse des corrélations a permis d'aborder les hypothèses 4, 6, 7 et 8 avec un seuil de validation de rho>0,4 (H4) ou rho<-0,4 (H6 et H7), utilisé en sciences sociales (Relethford and Lees, 1983) et qui traduirait une corrélation non négligeable étant donné la taille de la population statistique (34 841 communes métropolitaines).

Commentaire de l'équipe projet : le taux d'alertabilité par CB et LB-SMS a été estimé sur chacune des 34 842 communes de la France métropolitaine dans un premier temps. Les mêmes traitements ont ensuite été réalisés sur La Réunion et la Martinique (car des données de nature similaire existent). De façon plus exploratoire, d'autres traitements ont été réalisés sur d'autres territoires en septembre et octobre 2021 (sur la Polynésie française, Saint-Martin, la Guyane…). Ils ne seront pas présentés ici mais les bases de données sont consolidées au moment de la rédaction de ce livrable. En complément, en plus des scores de performance des LBAS à l'échelle nationale, les indices de Gini et de Moran et une analyse selon le profil des communes vont permettre de détecter d'éventuelles différenciations spatiales.

4. Résultats obtenus dans différents territoires

4.1 À l'échelle de la métropole française

Des différences remarquables

D'après nos calculs, 99,6% des français résident dans un endroit couvert par la 2G / 3G / 4G à l'échelle métropolitaine, et les très rares zones blanches (non couvertes par un réseau) sont localisées dans des zones rurales à faible densité de population (notamment dans les Alpes et dans le sud du Massif Central). 86% des individus résident dans une zone couverte par la 4G. D'après nos estimations issues des résultats du baromètre du numérique, 94,5% des français possèdent un téléphone mobile (y compris smartphone) tandis que 74,38% des français possèdent un smartphone. Le TC du téléphone mobile est donc supérieur à celui du smartphone de 20,2.

Comme le montre la première carte (**Figure 3**), une solution d'alerte sur la 2G / 3G / 4G est doté d'un fort potentiel : **94,21% des français seraient alertables**. Le score de performance médian atteint 92,5% sur les 34 842 communes françaises, et 50% des communes ont un taux d'alertabilité compris entre 92,95% (Q1) et 94,8% (Q3). 97,8% des communes ont un taux d'alertabilité supérieur à 75% et seulement 5 communes ont un taux d'alertabilité de 0. La cartographie du potentiel d'alertabilité sur la 4G (**Figure 4**) présente des scores plus faibles : **81,3% des individus seraient alertables** (38,5 millions d'individus), soit 12,9% de moins. Le choix de ne déployer le CB que sur la 4G a aussi des conséquences sur l'égalité de la solution : l'indice de Gini est de 0,37 alors qu'il est de 0,02 en déployant le CB sur les réseaux 2G / 3G / 4G (soit un différentiel d'inégalité de 0,35 sur 1).

En comparant ces deux cartes, on observe un net renforcement des contrastes observés entre les deux configurations : les communes où le potentiel reste élevé sont localisées sur les littoraux, les principaux axes de communication et dans les grandes aires urbaines (**Figures 3 et 4**). Ce constat est validé par l'analyse statistique des taux d'alertabilité sur le réseau 4G en fonction de la typologie des aires urbaines (**Tableau 3**). Plus l'aire urbaine est petite, moins le CB est performant et le différentiel de performance est de 23,8% entre les grandes aires urbaines (> 500 000 habitants) et les communes hors aires urbaines. La corrélation entre le taux de performance et le nombre d'habitants est importante dans les communes hors aire urbaine ou appartenant à de petites aires urbaines, plus que dans les communes appartenant à de moyennes ou grandes aires urbaines (Bopp, 2021).

Classification AU	Performance (TA) sur le réseau 4G et +	Moyenne des TA des communes	Corrélation Habitants (Spearman)
Zone rurale	57,49%	44,95%	0,22
Petite AU	79,97%	63,63%	0,21
Moyenne AU	84,99%	68,10%	0,13
Grande AU	88,45%	68,96%	0,09
Total	81,30%	55,87%	0,08

Tableau 3. Résultats de la performance sur la 4G en métropole selon les types d'aires urbaines

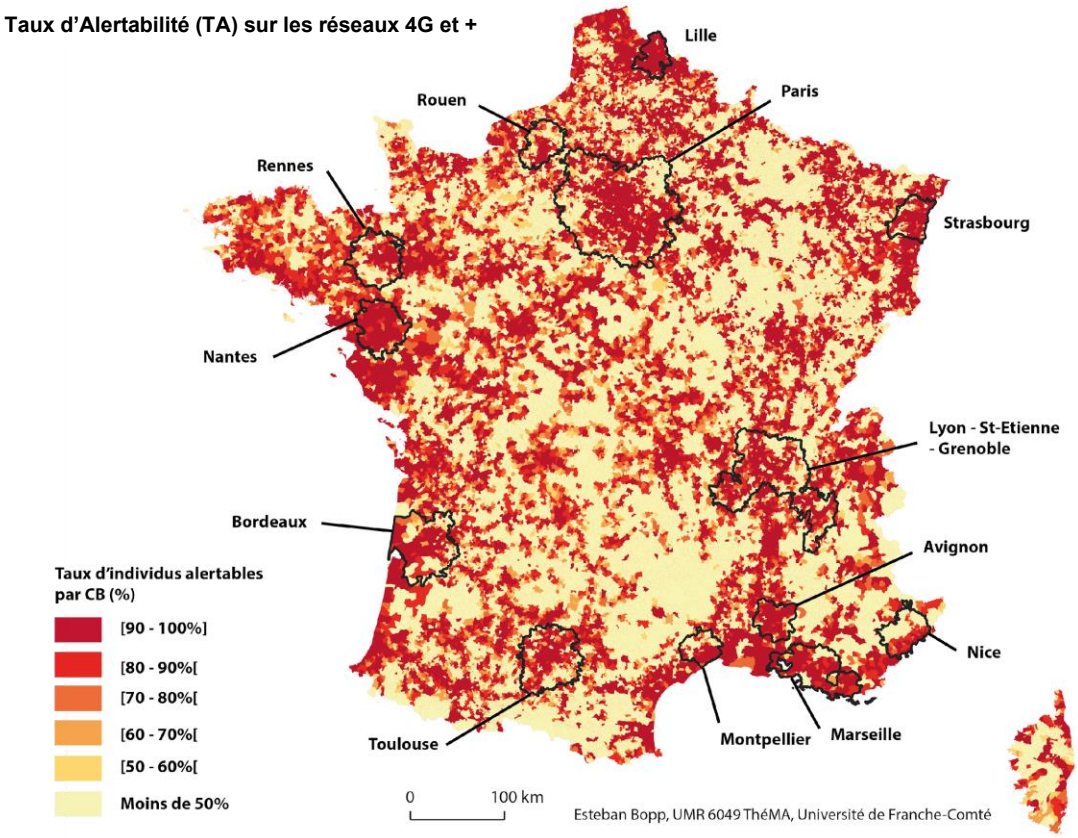

Figure 3. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 4G en France métropolitaine

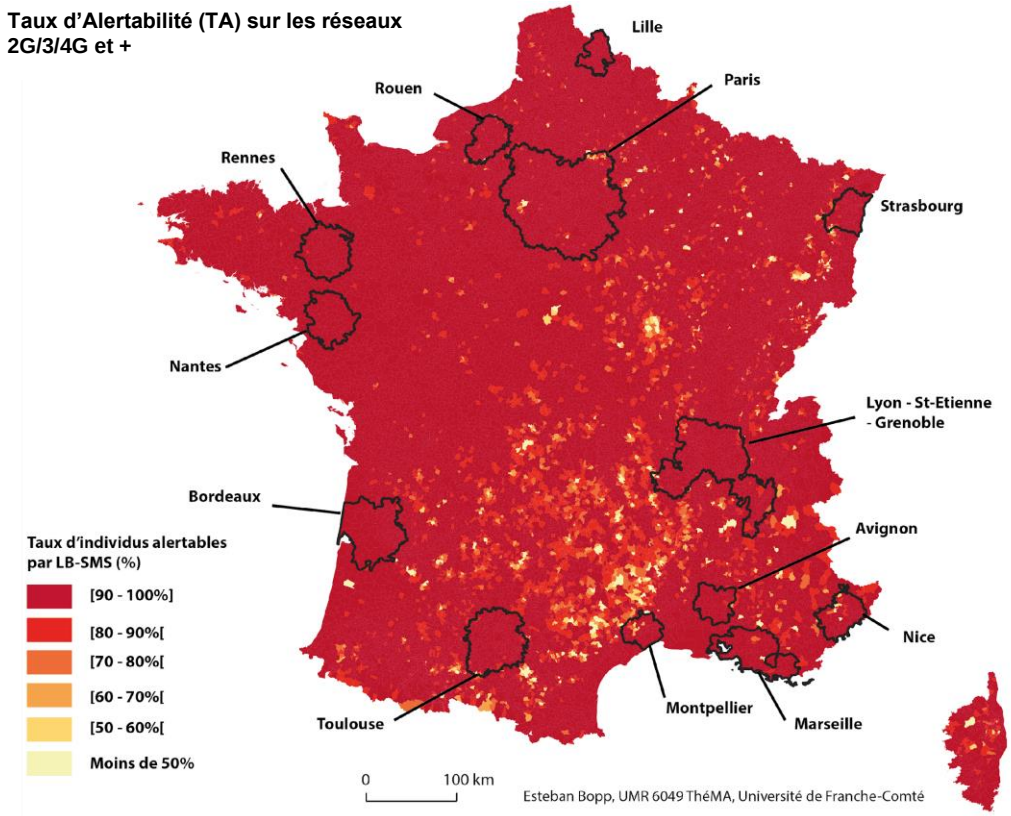

Figure 4. Taux d'alertabilité d'une alerte sur les réseaux 2G / 3G / 4G en France métropolitaine

Des disparités spatiales qui se creusent en fonction des réseaux choisis

A l'échelle départementale, la carte des points chauds et froids de performance sur les réseaux 2G / 3G / 4G confirme l'existence d'homogénéités à cette échelle : la performance sur le réseau 2G /3G / 4G est satisfaisante dans le nord-est et l'Ile-de-France (> 95 %), et reste > 90 % dans les autres départements. A l'échelle communale, la cartographie de l'indice localisé de Moran (LISA, Oliveau, 2005) vient affiner cette analyse à échelle fine (**Figure 5**). Des disparités apparaissent, et notamment la disparité Nord/Sud où le Nord serait avantagé par rapport au Sud. La « diagonale du vide » (du Sud-Ouest au Nord-Est de la France ; Oliveau and Doignon, 2016) se visualise aisément : la majorité des communes apparaissent comme un point froid d'alertabilité par CB/LB-SMS. A l'inverse, on note que les points chauds sont situés sur les principales aires urbaines. Les aires urbaines de Bordeaux, Toulouse, Montpellier et Marseille ressortent comme des points chauds au milieu d'un zonage de point froid qui caractérise une bonne partie de la moitié Sud du pays. Dès lors, on peut conclure que de grandes unités spatiales d'alertabilité ressortent mais qu'elles sont nuancées par les grandes aires urbaines françaises, toujours identifiées comme point chaud d'alertabilité sur les réseaux 2G / 3G / 4G. L'indice global de Moran de l'alertabilité sur les réseaux 2G / 3G / 4G est de 0,14 sur 1. C'est un score assez faible qui signifie que que la tendance à ce que les communes proches aient un taux d'alertabilité plus proches que les communes éloignées est faible.

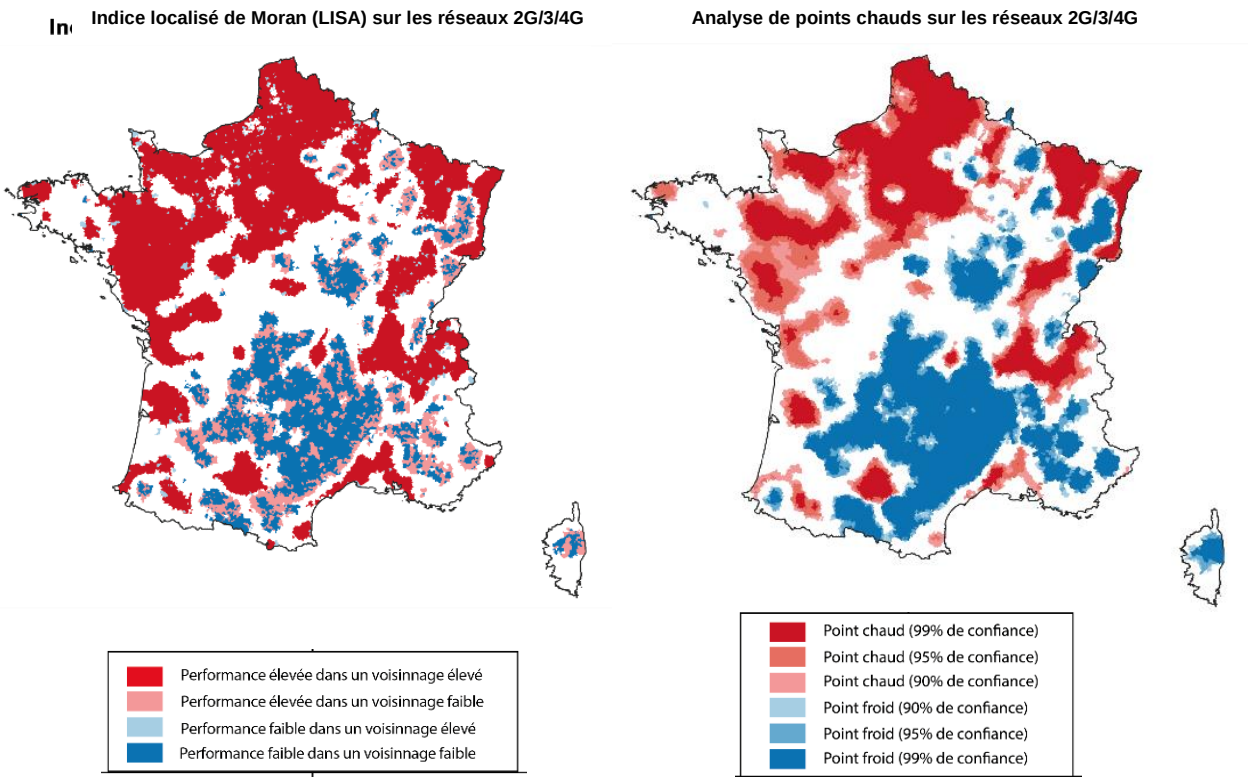

Figure 5. Analyse spatiale de l'homogénéité et du niveau de performance sur un réseau 2G / 3G / 4G

La cartographie de l'indice localisé de Moran sur le réseau 4G uniquement conforte l'existence **de cette diagonale du vide de plus faible performance** (**Figure 6**), également perceptible sur la cartographie de point chaud et de point froid (**Figure 7**). Cette diagonale est en contraste avec la façade nord-ouest, l'orient de la région Grand Est, une bonne partie de la région Rhône-Alpes et la façade littorale de la région PACA, où le CB est performant. Cependant, ces grands groupes spatiaux

sont parsemés, soit de petits groupes de communes de bonne performance (dans la diagonale du vide), soit de petits groupes de communes ayant une faible performance (dans les zones où le réseau 4G est moins spatialement performant). Ce constat explique la faiblesse de l'indice global de Moran de l'alertabilité sur le réseau 4G qui est de 0,11 sur 1. Là encore, cela signifie que la tendance à ce que les communes proches aient un taux d'alertabilité plus proches que les communes éloignées est faible.

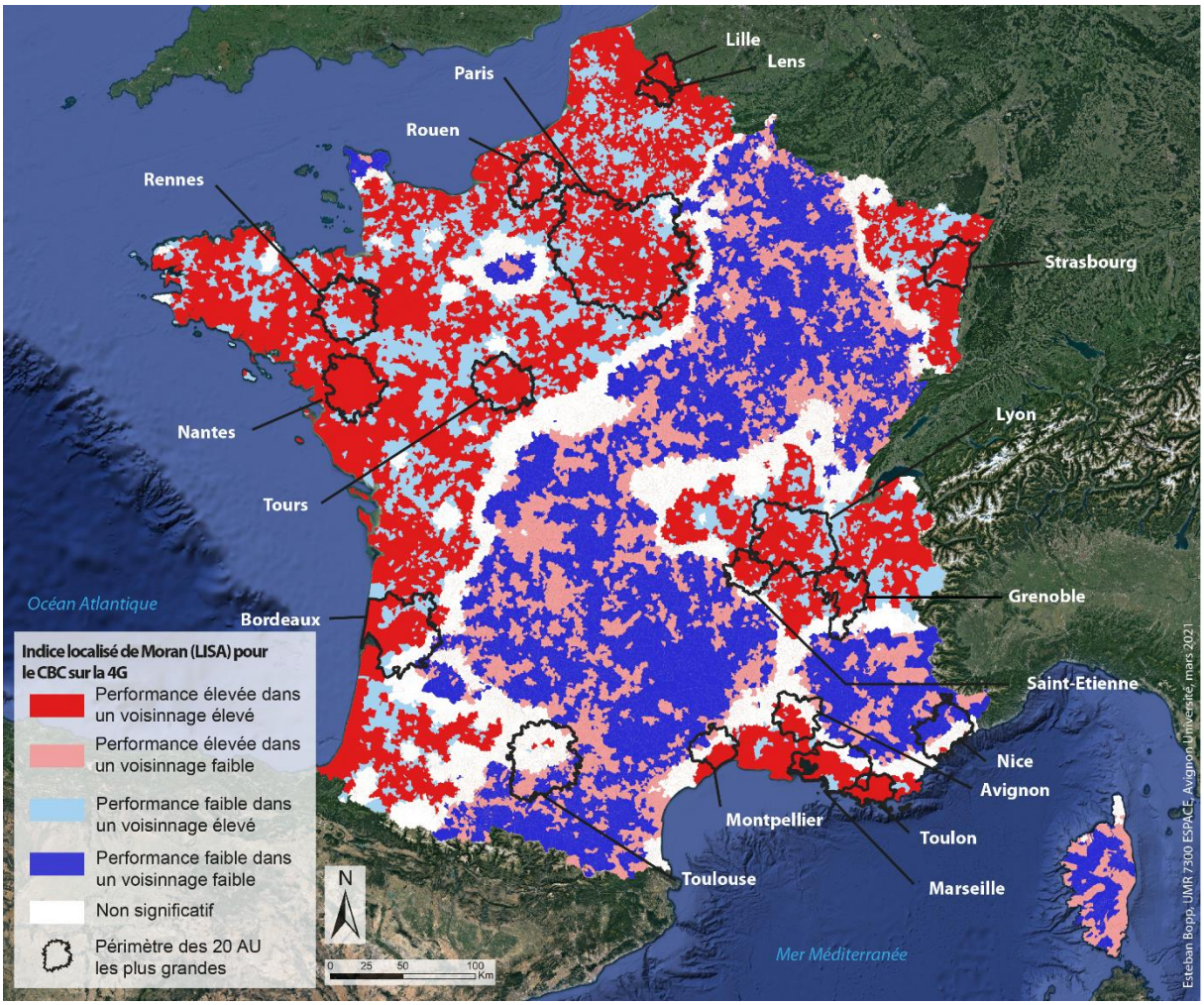

Figure 6. Indice localisé de Moran (LISA) sur la 4G en France métropolitaine

Par ailleurs, des analyses statistiques des résultats démontrent que : 1) la performance des LBAS sur un réseau 4G augmente avec la taille de l'aire urbaine mais pas sur un réseau 2G / 3G / 4G où le maximum de performance concerne les communes appartenant à de moyennes aires urbaines (entre 50 000 et 100 000 habitants) et non les communes appartenant à des aires urbaines de plus de 100 000 habitants ; 2) la performance des LBAS augmente significativement avec la population communale mais la corrélation est plus importante sur les réseaux 2G / 3G / 4G (r=0,29) que pour le réseau 4G (r=0,08) ; 3) la performance des LBAS décline avec l'augmentation du couvert forestier ; 4) la performance des LBAS décline avec l'augmentation de la dispersion de l'habitat (r=-0,35).

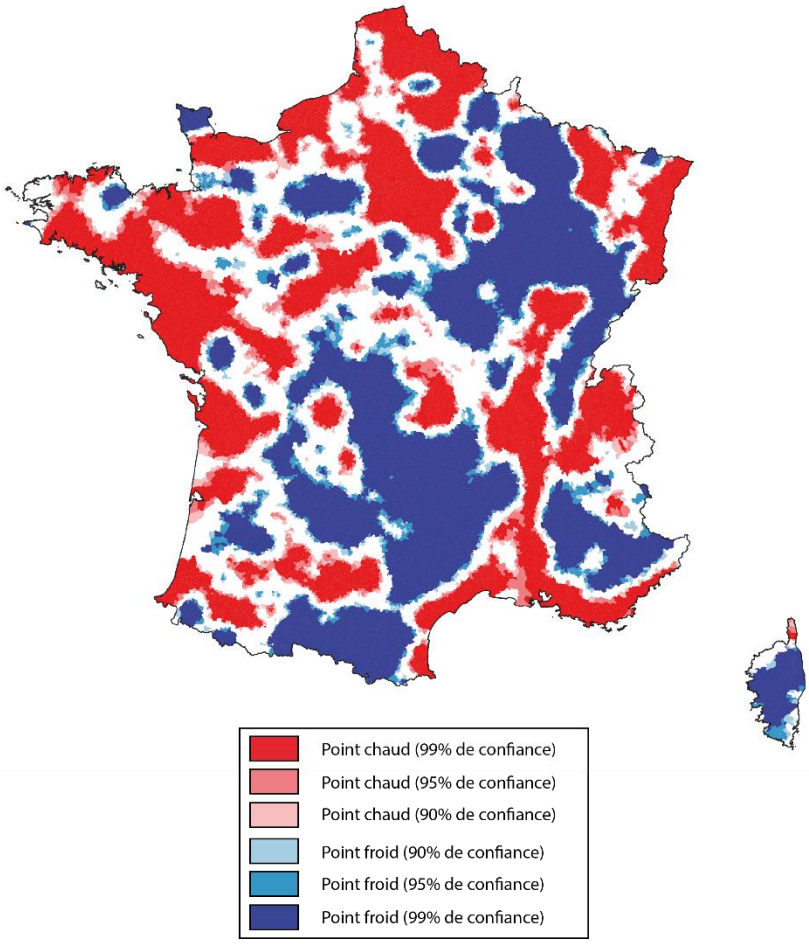

Figure 7. Analyse de point chaud de l'alertabilité par la 4G

4.2 À des échelles locales : l'exemple autour de la CU de Rouen

Les données ayant été estimées sur l'ensemble de communes métropolitaines, il est tout à fait possible de zoomer à des échelles fines. A titre d'exemple, nous avons choisi la Communauté Urbaine de Rouen (**Figures 8 et 9**) pour savoir sur une alerte sur le réseau 4G (indirectement par CB) aurait été utile (ou non) lors de l'accident industriel survenu près de Lubrizol en 2019 (cf. auditions du Préfet Durand qui avait, quelques jours après l'événement, critiquait l'absence d'une alerte par SMS).

L'alertabilité sur le réseau 4G confirme des **taux élevés** dans la ville de Rouen (97,3%), mais également dans les communes situées au sud-ouest, en rive gauche de la Seine (Orival, La Londe), ou au nord-est sur la rive droite (Houpeville, Isneauville). 40 communes ont un taux d'alertabilité supérieur à 90 %. A l'opposé, 15 communes ont des taux très faibles, inférieurs à 50 % (par exemple : Duclair, Bardouville ou Sahurs exemple) (**Figure 8**). Sur les 70 communes, la moyenne calculée atteint 74%, mais on voit bien émerger des disparités spatiales. Ces différences sont moins marquées si l'on fait l'hypothèse d'une alertabilité sur les réseaux 2G / 3G / 4G (**Figure 8**). La moyenne atteint 94,6% et les communes ont un taux dépassant 90 % (en tenant compte des résidents, et non des populations présentes).

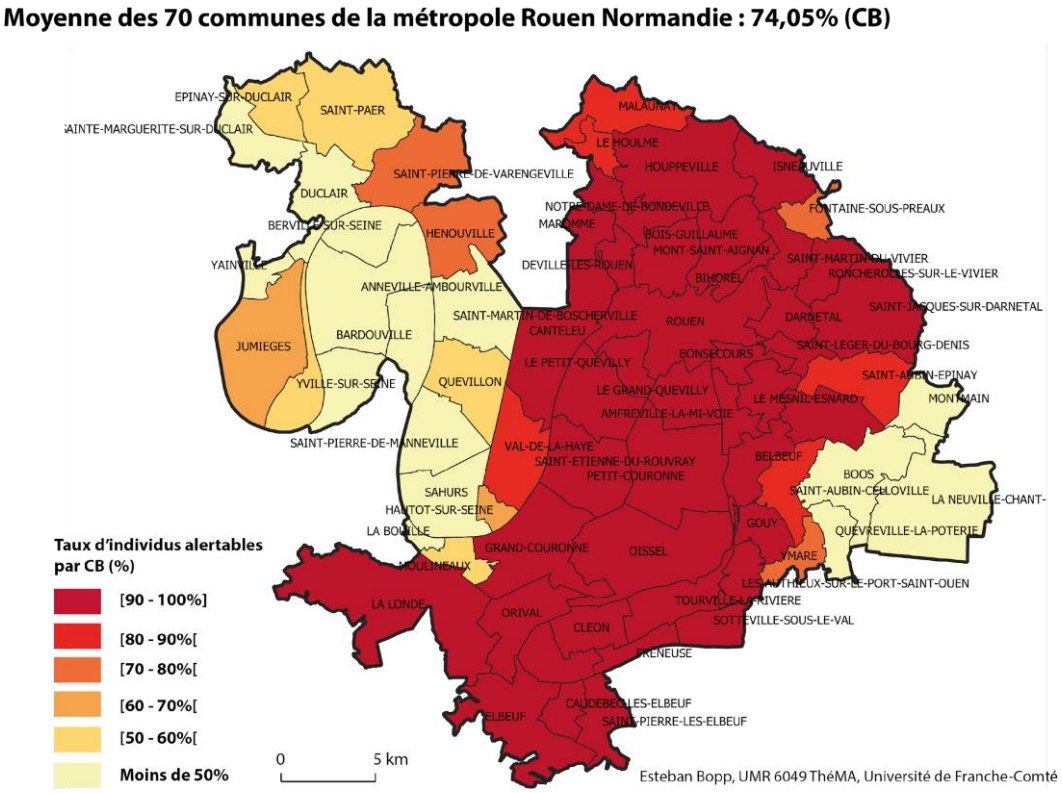

Figure 8. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 4G sur la Communauté Urbaine de Rouen

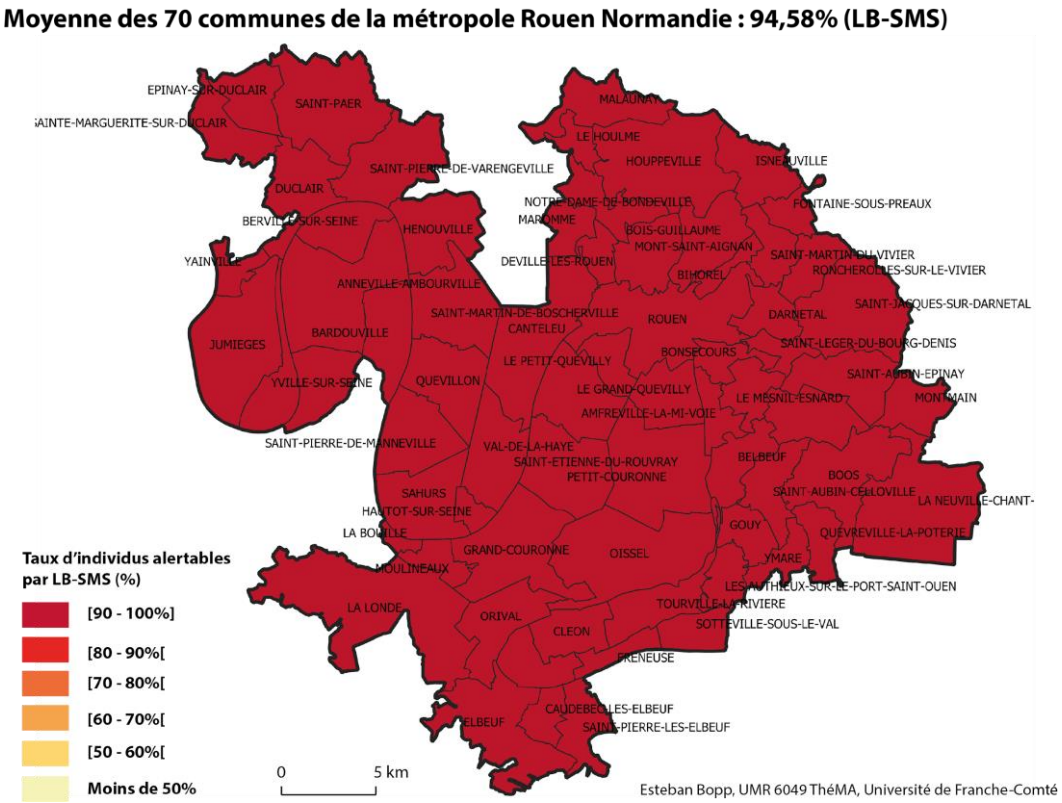

Figure 9. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 2G / 3G / 4G sur la Communauté Urbaine de Rouen

4.3 À l'échelle des Régions Ultrapériphériques : Réunion / Martinique

De façon similaire (avec les mêmes donnée et la même méthode), les estimations ont été calculées sur deux Régions Ultrapériphériques (RUP) : la Réunion et la Martinique. Les données carroyées de l'INSEE sont existantes sur ces deux RUP, et non sur les autres territoires d'outre-mer, ce qui justifie ce choix, indépendamment des risques ou des catastrophes survenues ces vingt dernières années.

Sur la Réunion, l'alertabilité sur le réseau 4G confirme des **taux élevés** sur l'ensemble de l'île (94,6%), et une seule commune (Salazie) présente des taux légèrement plus bas (83,4%). Ces taux élevés sont notamment liés à un taux de connectivité très élevée puisque les populations sont principalement situées sur les bordures des littoraux. Si l'on fait l'hypothèse d'une alertabilité sur les réseaux 2G / 3G / 4G, les taux sont eux aussi satisfaisants (**Figure 11**). La moyenne est de 95,0%, ce qui signifie qu'il y a peu de différences dans les couvertures spatiales de deux technologies.

En Martinique, les disparités spatiales sont en revanche plus marquées. Sur les réseaux 4G, l'alertabilité atteint une moyenne estimée de 92,9% (**Figure 12**). 19 communes présentent des taux supérieurs à 90% (avec un maximum à Porrt-au-Prince, avec 94,8%) ; 14 ont des taux compris entre 80 et 90%, en particulier les communes situées au sud, sud-ouest et au nord (soit les secteurs les plus éloignés par rapport à la capitale), et 1 commune (Le Précheur) a même une variable relativement faible (78,1%). Ces taux sont moins hétérogènes si l'on fait l'hypothèse d'une alertabilité sur les réseaux 2G / 3G / 4G (**Figure 13**). La moyenne atteint 93,6% et les communes ont quasiment toutes un taux dépassant 90 % (à nouveau la commune du Précheur présente des valeurs faibles). La couverture réseau n'est pas en accord avec la distribution de la population résidente, et le taux d'alertabilité est plus faible qu'ailleurs à cause d'un taux de connectivité qui est bien moins satisfaisant qu'ailleurs.

4.4 Conclusions intermédiaires

Un tableau synoptique (**Tableau 4**) permet d'avoir une vue globale sur les trois territoires étudiés dans le cadre de ce travail (sans reprendre le zoom très localisé sur la CU de Rouen). Les moyennes sont très satisfaisantes si l'on compare ces chiffres à la couverture théorique spatiale d'autre outils, en particulier les sirènes étatiques : 32,1% des résidents se situent dans la zone de portée sonore des sirènes avec un rayon d'audibilité d'1km (Douvinet, 2020), alors que le CB sur le réseau 4G permet de couvrir 81,3% des résidents (voire 94,2% avec le LB-SMS sur les réseaux 2G / 3G / 4G). Les moyennes sont élevées pour les taux de connectivité sur le LB-SMS (plus de 99%), ce qui conforte l'utilité de ces solutions, bien plus adaptées au contexte actuel. Afin de compléter ce travail, une autre étude est actuellement menée en lien avec le CCED, pour estimer les taux sur d'autres territoires (Guyane, Saint-Martin, Polynésie…).

		Taux de connectivité (TC)		**Taux d'équipement (TC)**		**Taux de connectivité (TC)**	
	Territoire	4G	2G-3G-4G	4G	2G-3G-4G	4G	2G-3G-4G
Métropole	Métropole	85,08	99,63	95,56	95,56	81,3	94,21
RUP	Martinique	98,22	99,41	94,55	94,55	92,87	93,64
RUP	La Réunion	99,43	99,78	95,19	95,19	94,32	94,98

Tableau 4. Synthèse des taux estimés sur les territoires étudiés

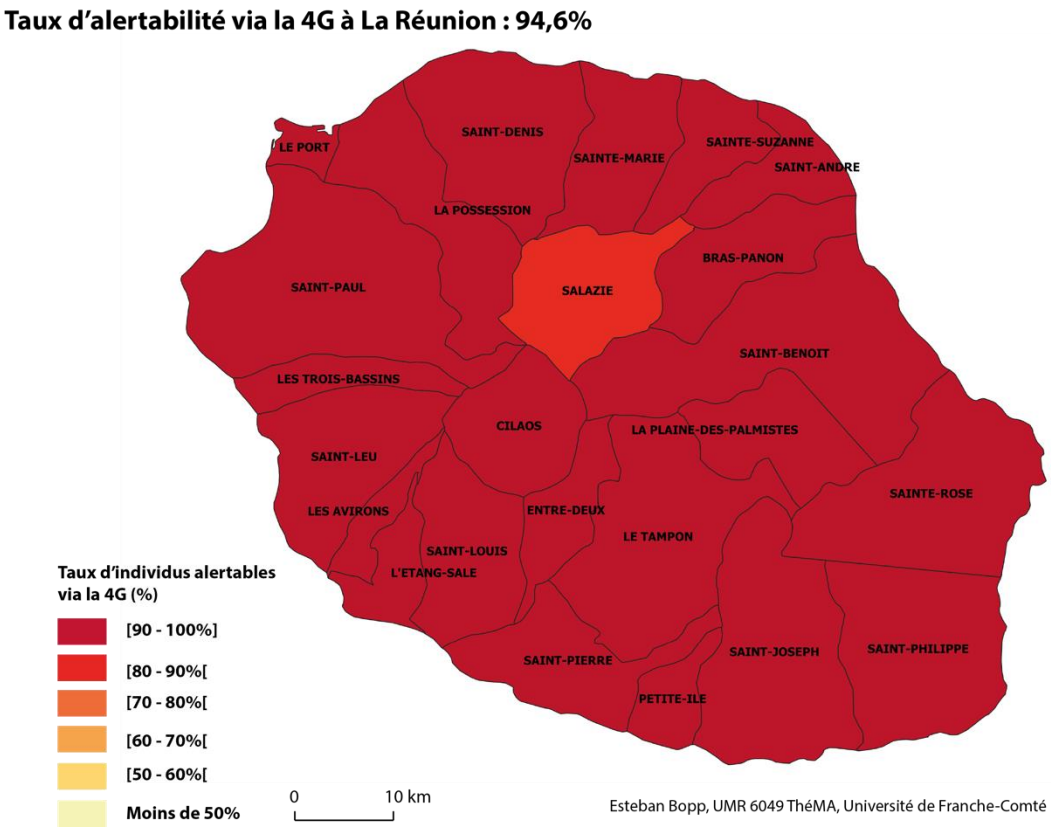

Figure 10. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 4G sur La Réunion

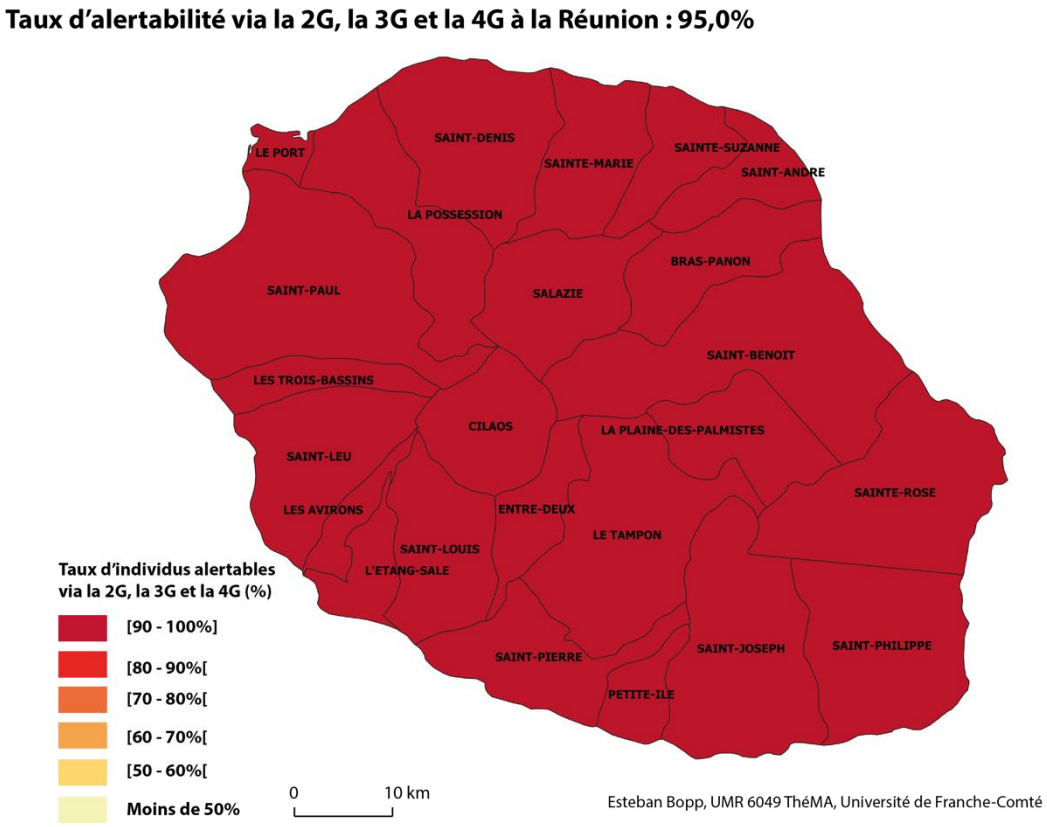

Figure 11. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 2G / 3G / 4G sur La Réunion

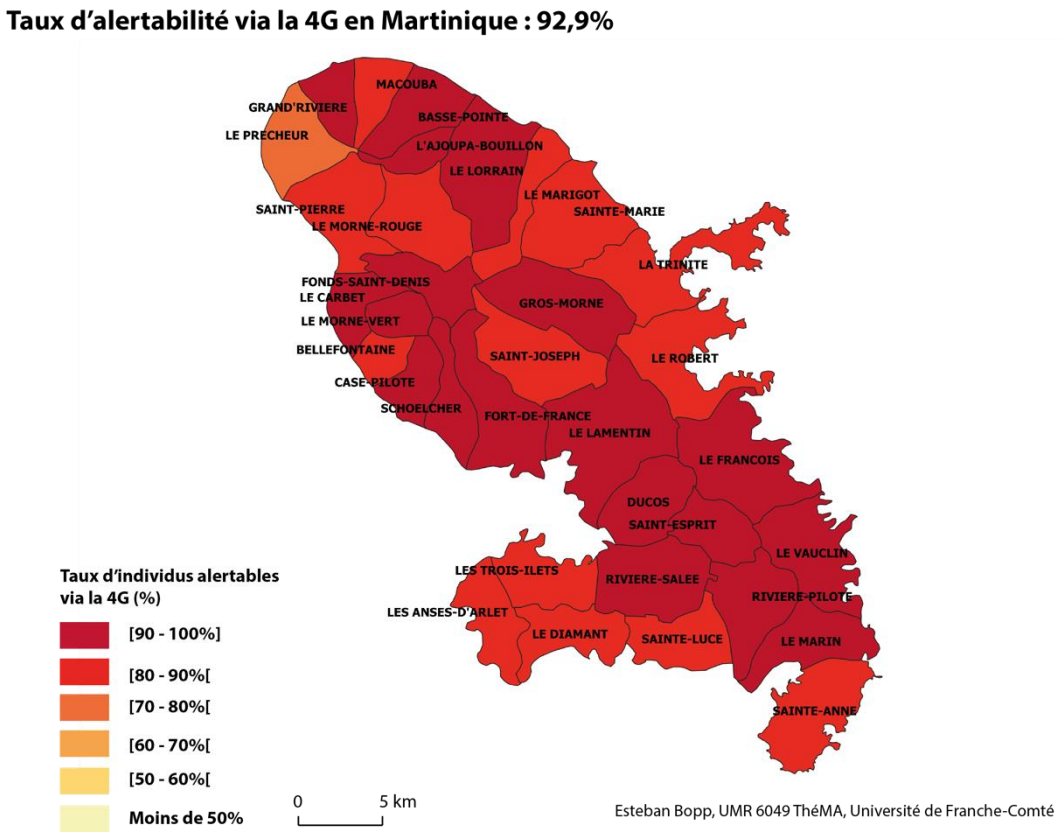

Figure 12. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 4G sur La Martinique

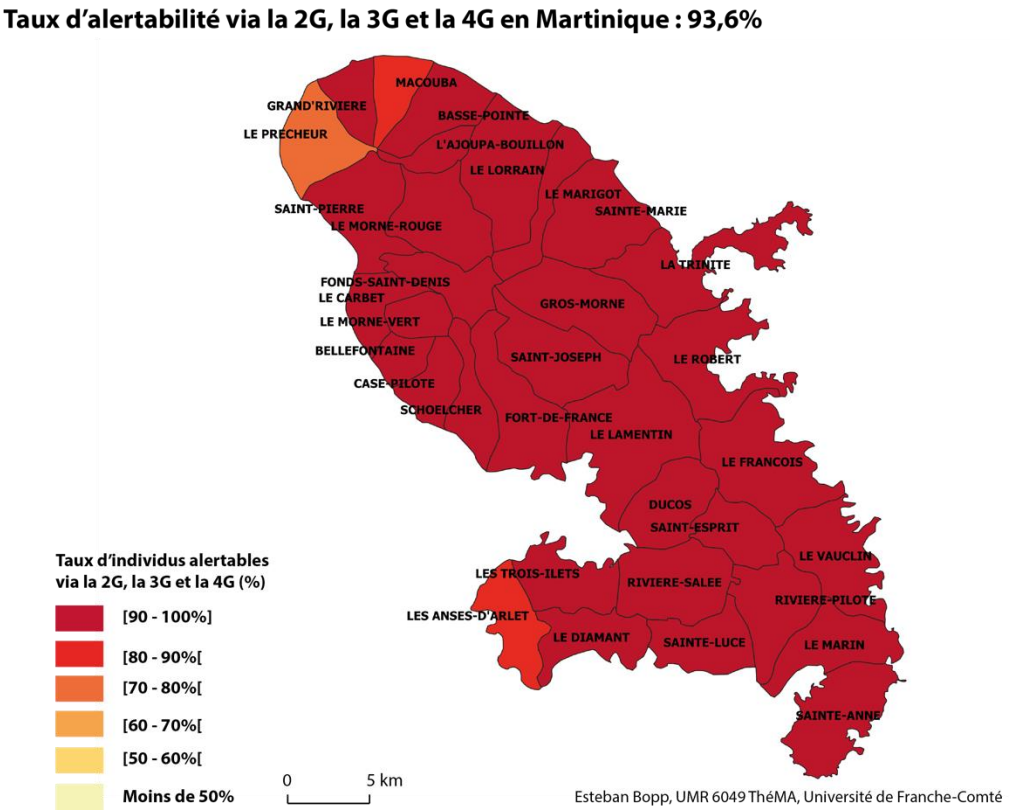

Figure 13. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 2G / 3G / 4G sur La Martinique

5. Éléments de discussions

5.1 Quelle performance durant la journée ?

Les estimations précédentes considèrent la population résidente (faute d'avoir à disposition des données plus précises), ce qui est un biais important (cela revient à négliger les mobilités pendulaires, durant la journée, ou les déplacements des personnes pour des raisons professionnelles, médicales ou de loisirs). Il est tout aussi difficile de connaître le nombre d'individus qui peuvent être alertés à l'échelle locale et en temps réel pour une solution donnée, en raison des déplacements des individus dans l'espace et dans le temps. Nous avons tout de même essayé d'aller au-delà de la seule considération de la position résidentielle des individus analysée dans cette étude. Comme il n'existe pas à notre connaissance de données sur la localisation fine des emplois (à l'échelle infra-communale), nous avons procédé de manière indirecte en localisant, à l'échelle de la région Sud-PACA, les travailleurs dans les zones urbanisées référencées dans la base de données d'occupation des sols OCSOLPACA. Le nombre d'individus travaillant dans chaque commune est extrait de la base de données de l'INSEE (base emploi au lieu de travail, 2016) et est ajouté aux inactifs, chômeurs et retraités pour obtenir une estimation du nombre d'individus présents dans la commune pendant les heures de travail.

Ainsi ce n'est plus la population résidente que nous étudions, mais la population présente aux heures de travail dans la commune, même si des biais de localisation existent (localisation homogène à l'échelle des zone urbanisées). Une fois les individus localisés, nous avons recalculé les taux d'équipement et les taux de connectivité, qui nous donnent un nouveau taux d'alertabilité. Il faut en revanche noter que le taux d'individus se connectant leur smartphone à la Wifi de leur domicile n'a pas été pris en compte (il n'existe pas non plus de données sur le nombre d'individus connectant leur smartphone à la Wifi de leur lieu de travail). Nous appelons « scénario A », le scénario localisant les résidents et « scénario B », le scénario localisant les travailleurs.

Avec cette méthode, 92,7% des travailleurs seraient alertables sur les réseaux 2G/3G/4G dans la région Sud-PACA et 88,1% sur le réseau 4G uniquement (**Tableau 5**, **Figures 14** et **15**). La différence entre les deux scénarios est relativement faible concernant les réseaux 2G/3G/4G (+0,29% pour le scénario localisant les individus sur leur lieu de résidence). Dans la majorité des cas, la différence d'alertabilité entre les deux scénarios est inférieure à 10% (pour près de 90% des communes). Seules 0,95% des communes de la région ont un potentiel d'alertabilité de 10% supérieur dans le scénario B par rapport au scénario A. Pour le réseau 4G, la différence entre les deux scénarios est plus significative (+8,68% pour le réseau localisant les individus sur leur lieu de travail). Si là encore, la majorité des communes se caractérisent par un différentiel d'alertabilité entre les scénarios inférieurs à 10% (pour plus de 85% des communes), 7,3% des communes ont un potentiel d'alertabilité de 10% supérieur pour le scénario B par rapport au scénario A. Ces résultats nous permettent de déduire qu'en région Sud-PACA, le CB (si déployé uniquement sur la 4G) à un meilleur potentiel d'alertabilité de jour, durant les heures de travail, que de nuit, durant les heures où les individus sont chez eux. Il serait toutefois intéressant d'élargir la méthode au reste de la France, à condition de disposer de données fines et homogènes concernant l'occupation du sol.

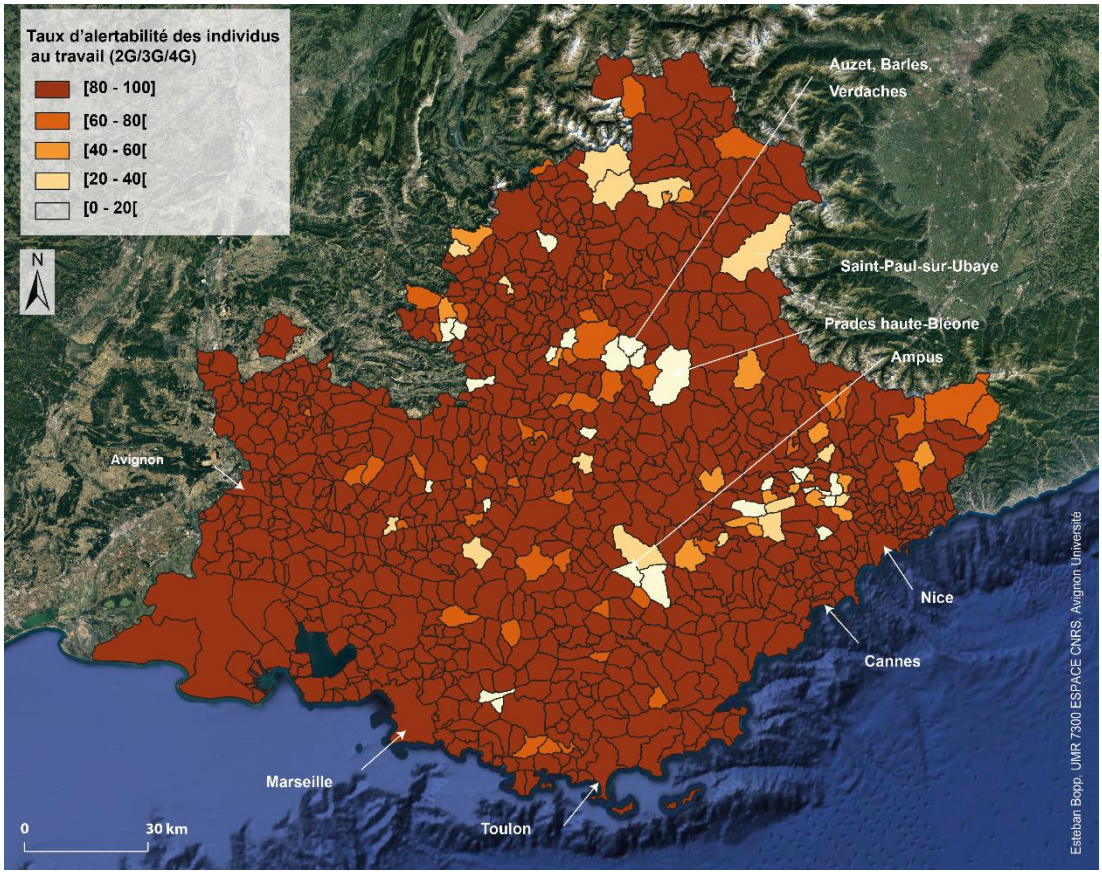

Figure 14. Taux d'alertabilité des individus au travail (scénario B) sur les réseaux 2G/3G/4G

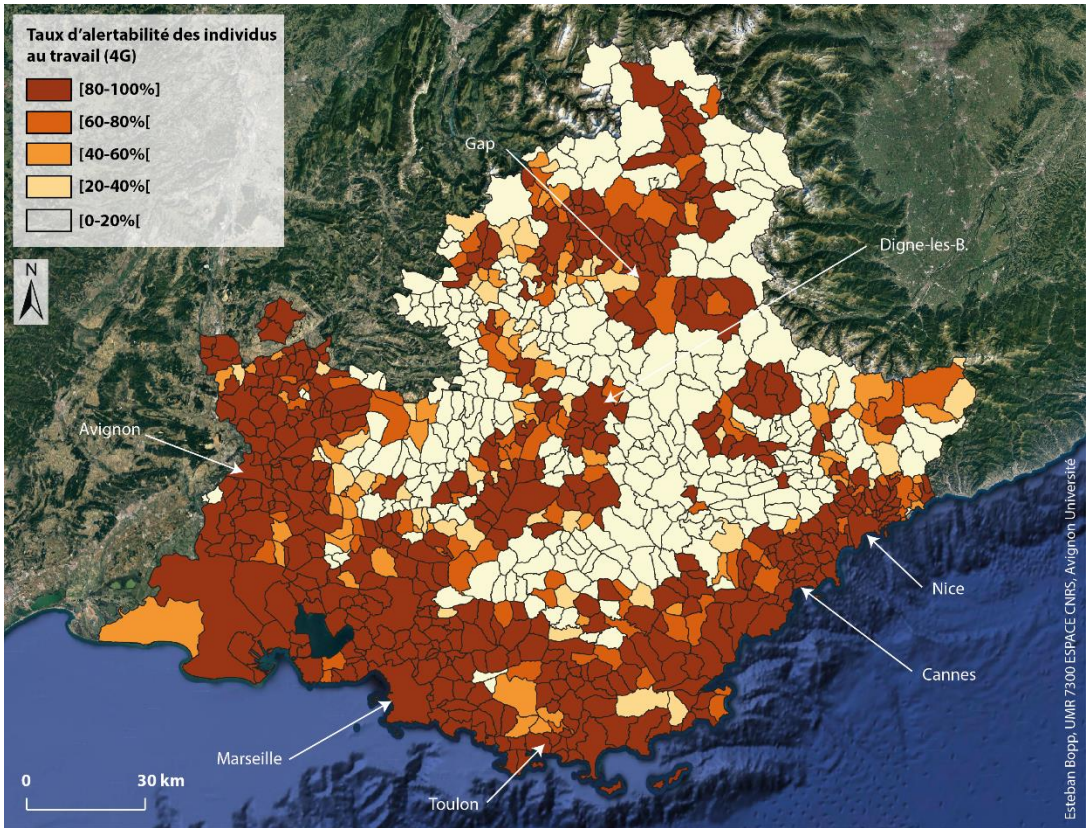

Figure 15. Taux d'alertabilité des individus au travail (scénario B) sur le réseau 4G

	Scénario A	Scénario B	A>B d'au moins 10%	A=B [-10 ;10%]	A<B d'au moins 10%
2G / 3G / 4G	92,98%	92,69%	9,09%	89,96%	0,95%
4G	79,42%	88,1	6,55%	86,15%	7,29%

Tableau 5. Performance des LBAS selon le scénario en région Sud-PACA

5.2 Des sirènes à implanter dans les zones blanches de la 4G ?

L'équipement en sirène(s) pourrait être pertinent dans les territoires où l'alertabilité a une performance limitée. Ce serait en effet un moyen complémentaire qui viendrait renforcer l'alerte locale, même s'il est complexe de comparer l'efficacité d'un message d'alerte reçu sur un téléphone mobile avec le son d'une sirène ne renseignant pas sur la nature du danger. Nous avons testé la complémentarité du couple CB vs. Sirène dans la région Sud-PACA, où 94 communes appartiennent à un point froid de performance. Nous avons modélisé l'installation d'une sirène dans chacune des municipalités, et comparé leur performance avec celle du CB (**Figure 16**). Compte tenu du caractère rural de ces communes (avec une moyenne de 484 habitants), nous n'avons modélisé qu'une seule sirène par municipalité que nous avons localisé sur la mairie. Nous avons repris la technique de l'aire d'audibilité (1 413m) appliqué aux sirènes pour estimer leur performance (Bopp, 2021). Les résultats démontrent une amélioration du taux d'alertabilité pour 51 communes (+29,7% de la population alertée en moyenne). En revanche, la sirène reste moins efficace que le CB pour 44 communes (-20,8% de la population alertée en moyenne). A l'échelle de 94 communes, les sirènes modélisées ont amélioré le nombre de personnes pouvant être alertées de 6,0% en moyenne par rapport au CB, mais cette différence n'est pas significative (P=0,721).

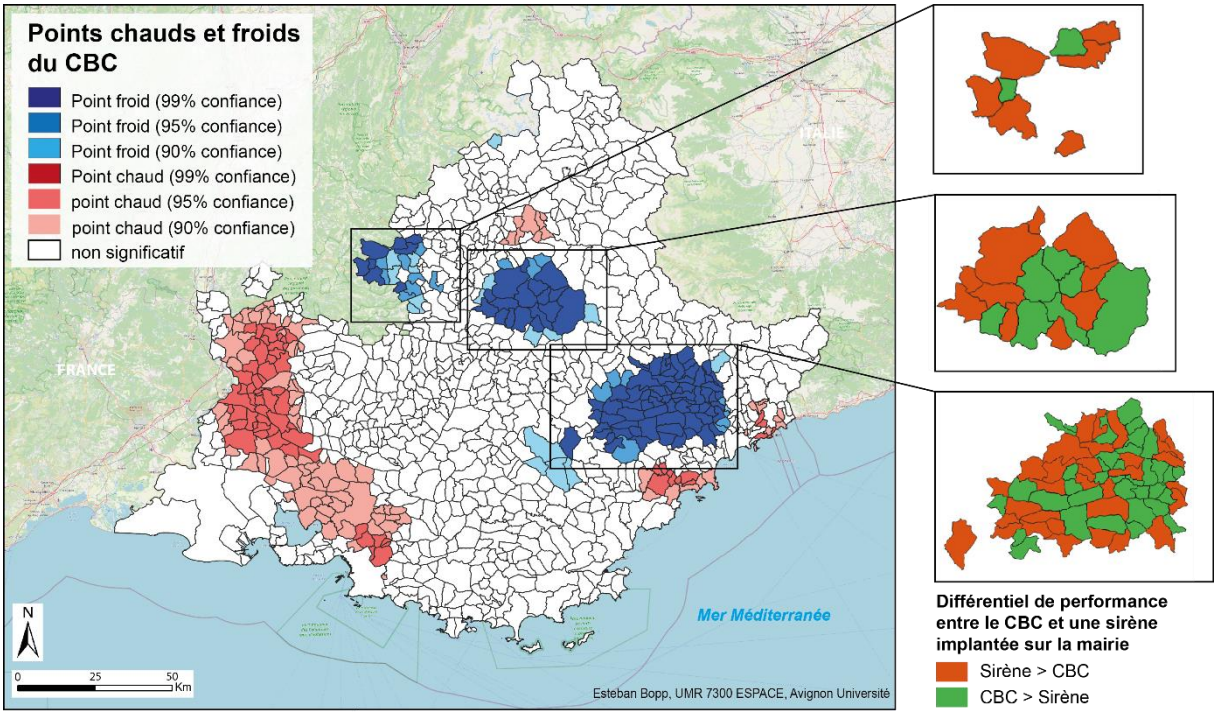

Figure 16. Points chauds et froids du CB en région Sud-PACA, et différentiel de performance avec la sirène sur les points froids

Afin d'améliorer la complémentarité entre le CB / LB-SMS et la sirène, il serait nécessaire de travailler à une échelle infra-communale pour localiser les sirènes dans les groupes d'habitants non couverts par les réseaux de télécommunication. Ce procédé apparaît comme étant à contre-courant de la stratégie d'équipement des communes en sirènes, qui se concentre sur les zones densément peuplées, alors même que c'est déjà là où les LBAS (CB, mais aussi LB-SMS) sont performants.

5.3 Une spatialisation possible de la logique multicanale ?

Si l'on ne tient pas compte des contraintes techniques des opérateurs, ni de la cinétique des aléas, une cartographie territorialisant les LBAS à petite échelle a été imaginée. Sachant que le CB n'est pas soumis au risque de congestion (contrairement au LB-SMS), et qu'il sera susceptible déployé uniquement sur la 4G, nous avons imaginé une dichotomie entre les solutions centrées sur l'opposition urbain/rural : l'une (le CB) dédiée aux communes urbaines, et l'autre (le LB-SMS) aux communes plus rurales. Le CB pourrait être déployé sur les grandes et moyennes aires urbaines, où la solution reste très performante, même si ce type d'aire urbaine comprend également des communes peu peuplées. A l'inverse, le LB-SMS pourrait être déployé sur le reste des communes, c'est-à-dire sur les communes appartenant à de petites aires urbaines (moins de 100 000 habitants) et sur des communes hors aires urbaines.

Nous avons fait ces choix pour **optimiser la spatialisation de la territorialisation du CB, du LB-SMS et d'une alerte par sirènes à l'échelle communale**. Nos choix ont été appliqués à l'échelle de la métropole, qui constituent une zone d'étude, et ils sont rappelés brièvement :

- Le CB est déployé dans les communes appartenant à des aires urbaines de plus de 100 000 habitants (et uniquement sur le réseau 4G) ;
- Le LB-SMS est déployé dans les communes appartenant à des aires urbaines de moins de 100 000 habitants et dans les communes hors aires urbaines.
- La sirène est déployée, en complément des deux solutions précédentes, dans les communes où ces solutions ont un taux de performance inférieur à 75% des individus.

Dans cette configuration, la majorité des communes pourrait être couverte par le LB-SMS (23 058 communes) et 11 000 communes serait équipées du CB (**Figure 17**). L'alerte serait renforcée par la sirène pour 5 044 communes dont 4 362 communes équipées en CB et 682 communes équipées en LB-SMS. Cet écart est dû au fait que nous avons considéré le CB comme étant uniquement déployé sur la 4G tandis que le SMS est déployé sur tous les réseaux de télécommunication. Dans le cas où le CB serait déployé même sur les réseaux 2G au minimum, le nombre de communes où l'alerte devrait être renforcée par sirène descendrait à 101 (soit 4 261 communes en moins).

Le renforcement de l'alerte par sirène concerne des communes moins peuplées que les communes où ce renforcement n'est pas nécessaire. Ce constat n'est pas surprenant, mais il confirme que les choix étatiques de déploiement des sirènes SAIP dans les communes densément peuplées n'est pas logique, puisque ce sont essentiellement les communes faiblement peuplées, là où l'alerte par LBAS est limitée, qui en ont réellement le plus besoin (sans considérer le niveau de risque).

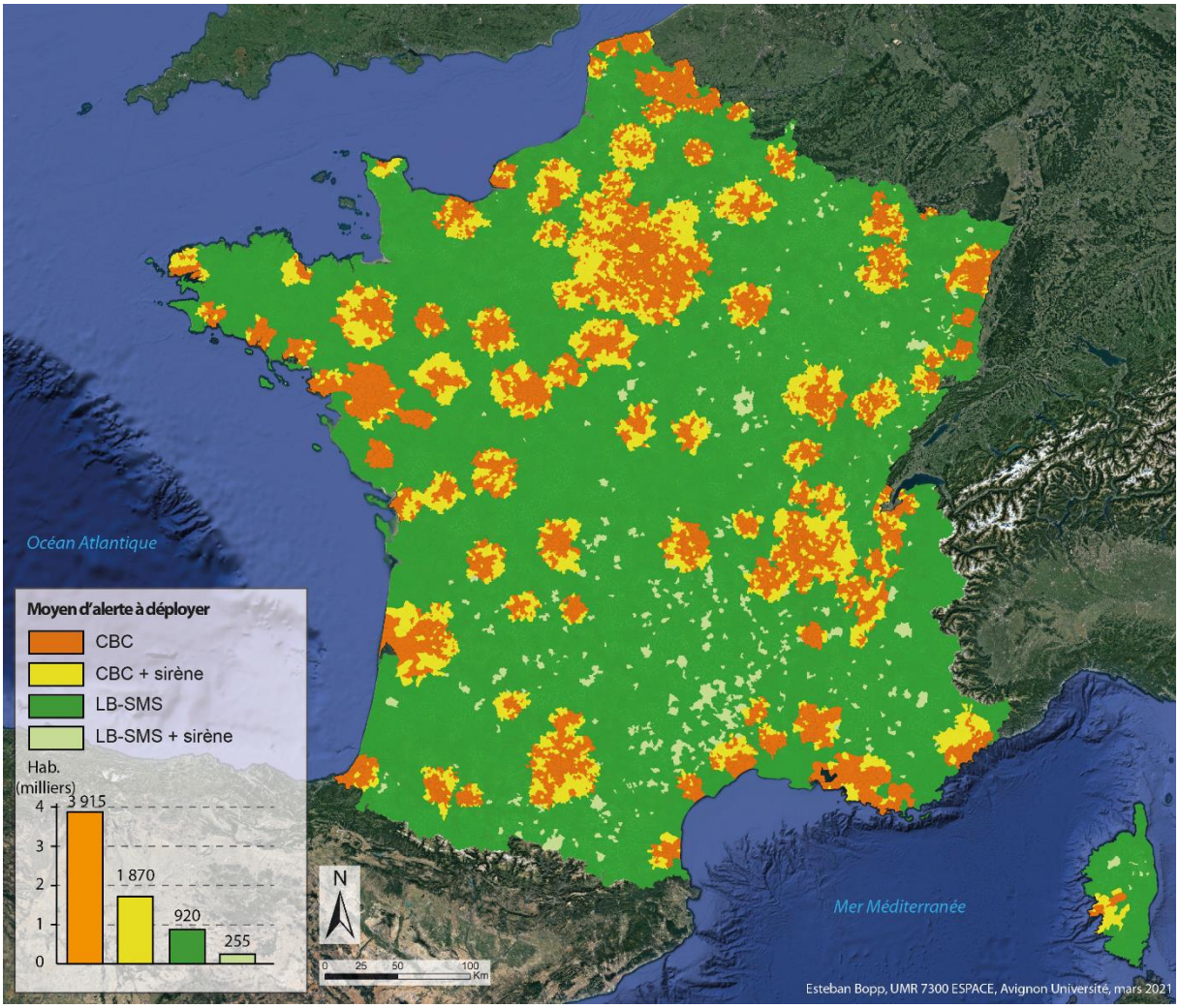

Figure 17. Proposition de territorialisation du CB, du LB-SMS et de la sirène à l'échelle communale en France métropolitaine

Commentaire de l'équipe projet : L'excellente performance des LBAS à l'échelle nationale ne gomme pas pour autant la notion d'alerte multicanale qui doit être conceptualisée en France en tenant compte des caractéristiques des territoires. Ce principe permettrait concrètement de renforcer l'ensemble du système d'alerte par la redondance des moyens et le recours à des moyens traditionnels dans les communes où les LBAS sont peu performants.

6. Conclusions et perspectives

Ce livrable a permis de proposer, de tester et d'expérimenter une méthode d'estimation de l'alertabilité sur les réseaux 4G ou 2G / 3G / 4G à une échelle communale, et en regardant les résultats à différents niveaux d'observation (départements, régions, échelle large). Un potentiel d'alertabilité correspondant au taux d'individus potentiellement atteignable à a été calculé pour le CB ou le LB-SMS, et cette méthode a confirmé la très bonne performance de ce deux futures technologies (qui seront opérationnelles au plus tard le 21 juin 2022), dans la mesure où les individus sont localisés dans leur lieu de résidence.

Nous estimons que 81,8% de la population métropolitaine seraient techniquement alertable par CB, et à 94,6% par LB-SMS. L'échelle d'étude a aussi permis une analyse spatiale des résultats, analyse jamais observée dans les précédents travaux sur la performance des moyens d'alerte. L'excellente homogénéité spatiale de la performance des LBAS a été mis en évidence d'autant plus que la performance des LBAS augmente relativement peu avec la population communale. L'utilisation d'un LBAS en France rendrait donc le processus d'alerte plus égalitaire entre les communes, en plus d'améliorer considérablement le nombre d'individus alertables en comparaison avec les moyens d'alerte traditionnels.

Toutefois, les valeurs moyennes n'empêchent pas l'existence de disparités. Les communes rurales, de montagne ou ayant un habitat dispersé se caractérisent par une alertabilité par LBAS plus faible que les autres communes. Ces fragilités territoriales doivent être considérées si l'on souhaite bâtir un système d'alerte robuste et performant de manière égale sur l'ensemble du territoire français. Il faut à présent pousser davantage l'estimation en posant la question de leur acceptabilité sociale.

Hypothèse	Validée/rejetée
H1 : plus de 75% de la population française est alertable par LBAS	**Validée**
H2 : Les LBAS sont des moyens très égalitaires entre les communes	**Validée** sur les réseaux 2G/3G/4G **Rejetée** sur le réseau 4G
H3 : Les taux d'alertabilité des LBAS des communes proches sont davantage similaire que ceux des communes éloignées	**Rejetée**
H4 : La performance des LBAS augmente lorsque le nombre d'habitant augmente	**Validée**
H5 : Plus l'aire urbaine est grande, plus les LBAS sont performants	**Validée** pour les réseaux 2G/3G/4G **Rejetée** pour le réseau 4G
H6 : La performance des LBAS décline avec l'augmentation du taux de couverture forestière à l'échelle communale	**Validée**
H7 : La performance des LBAS décline lorsque la dispersion spatiale des habitats augmente à l'échelle communale	**Validée**

Tableau 6. Bilan sur la validation et/ou le rejet des hypothèses du WP1.3

Liste des figures et des tableaux

Figure 1. Des différentiels de performance des LBAS à travers les échelles en France ? 7
Tableau 1. Taux d'individus connectant leur smartphone au Wifi (d'après le CREDOC (2019)) 9
Tableau 2. Taux de possession de smartphone et de téléphone mobile (%) selon l'âge des individus et le nombre d'habitant de leur commune de résidence (d'après les données du CREDOC (2018)) 9
Figure 2. Méthode employée pour calculer le taux d'alertabilité par CB et par LB-SMS des individus résidents 10
Tableau 3. Résultats de la performance sur la 4G en métropole selon les types d'aires urbaines 12
Figure 3. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 4G en France métropolitaine 13
Figure 4. Taux d'alertabilité d'une alerte sur les réseaux 2G / 3G / 4G en France métropolitaine 13
Figure 5. Analyse spatiale de l'homogénéité et du niveau de performance sur un réseau 2G/3G/4G 14
Figure 6. Indice localisé de Moran (LISA) sur la 4G en France métropolitaine 15
Figure 7. Analyse de point chaud de l'alertabilité par la 4G 16
Figure 8. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 4G sur la Communauté Urbaine de Rouen 17
Figure 9. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 2G / 3G / 4G sur la Communauté Urbaine de Rouen 17
Tableau 4. Synthèse des taux estimés sur les territoires étudiés 18
Figure 10. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 4G sur La Réunion 19
Figure 11. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 2G / 3G / 4G sur La Réunion 19
Figure 12. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 4G sur La Martinique 20
Figure 13. Taux d'alertabilité d'une alerte sur la 2G / 3G / 4G sur La Martinique 20
Figure 14. Taux d'alertabilité des individus au travail (scénario B) sur les réseaux 2G/3G/4G 22
Figure 15. Taux d'alertabilité des individus au travail (scénario B) sur le réseau 4G 22
Tableau 5. Performance des LBAS selon le scénario en région Sud-PACA 23
Figure 16. Points chauds et froids du CB en région Sud-PACA, et différentiel de performance avec la sirène sur les points froids 23
Figure 17. Proposition de territorialisation du CB, du LB-SMS et de la sirène à l'échelle communale en France métropolitaine 25
Tableau 6. Bilan sur la validation et/ou le rejet des hypothèses du WP1.3 26

Liste des références bibliographiques

Azid, S., Sharma, B., Raghuwaiya, K., Chand, A., Prasad, S., & Jacquier, A. (2015). SMS based flood monitoring and early warning system. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 10, pp. 6387–6391.

Badoux, A., Graf, C., Rhyner, J., Kuntner, R., and McArdell, B.W. (2009). A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. *Natural Hazards* 49, pp. 517–539.

Bean, H. (2019). Mobile technology and the transformation of public alert and warning, Santa Barbara, California: Praeger Security International, 207p.

Bopp, E., Douvinet, J., & Serre, D. (2019). Faire un tri dans le monde des applis. Expérimentation sur 50 applications smartphones proposant d'alerter la population face aux risques majeurs en France. *Netcom* 32(3-4), pp. 385-406.

Bopp, E. (2021). Évaluation et spatialisation du potentiel offert par les moyens d'alerte centrés sur la localisation des individus. Expérimentation à différentes échelles en France. Thèse de doctorat. Avignon Université.

Brachotte, G. (2011). ICT in Rural Areas: from the digital divide to the revitalization of an area. EPISTEME 137–157.

Bricker, J.D., Schwanghart, W., Adhikari, B.R., Moriguchi, S., Roeber, V., & Giri, S. (2017). Performance of Models for Flash Flood Warning and Hazard Assessment: The 2015 Kali Gandaki Landslide Dam Breach in Nepal. *Mountain Research and Development* 37(1), pp. 5– 15.

Chilimo, W.L. (2008). Information and communication technologies and sustainable livelihoods: a case of selected rural areas of Tanzania. Thèse de doctorat, University of Kwazulu-Natal.

Cioca, M., Cioca, L.-I., & Buraga, S.-C. (2008). *SMS disaster alert system programming*. In 2008 2nd IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies, Phitsanulok: IEEE, pp. 260–264.

Douvinet, J. (2020). L'alerte par sirènes : une priorité discutable en France. *Annales de géographie* 731(1), 5p

Douvinet, J., Gisclard, B., Martin, G., Vinet, F., Bopp, E., Grancher, D., Coulon, M., & Genre-Grandpierre, C. (2019). Les sirènes sont-elles pertinentes en France pour alerter la population en cas de crues rapides ? *La Houille Blanche* 3-4, pp. 84–92.

Duncan, O.D., & Duncan, B. (1955). A Methodological Analysis of Segregation Indexes. *American Sociological Review* 20(2), pp. 210-217.

Faggiani, A., Gregori, E., Lenzini, L., Luconi, V., & Vecchio, A. (2014). Smartphone-based crowdsourcing for network monitoring: Opportunities, challenges, and a case study. *IEEE Communications Magazine* 52, pp. 106–113.

Gonzales, D., Miyashiro, L., Osburg, J., Shelton, S., & Woods, D. (2016). Geo-Targeting Performance of Wireless Emergency Alerts in Imminent Threats Scenarios. Volume 1: Tornado Warnings, Homeland Security, 124p.

Gu, G., & Peng, G. (2010). *The survey of GSM wireless communication system*. In 2010 International Conference on Computer and Information Application, Tianjin, China: IEEE, pp. 121–124.

Jagtman, H.M. (2010). Cell broadcast trials in The Netherlands: Using mobile phone technology for citizens' alarming. *Reliability Engineering & System Safety* 95(1), 18–28.

Kuantama, E., Setyawan, L., & Darma, J. (2012). *Early flood alerts using Short Message Service (SMS)*. In 2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), Bandung, West Java, Indonesia: IEEE, pp. 1–5.

Mahmud, I., Akter, J., and Rawshon, S. (2012). SMS based disaster alert system in developing countries: a usability analysis. *International Journal of Multidisciplinary Management Studies* 2, 15p.

Markwart, H., Vitera, J., Lemanski, S., Kietzmann, D., Brasch, M., & Schmidt, S. (2019). Warning messages to modify safety behavior during crisis situations: A virtual reality study. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 38(101235).

Oliveau, S., & Doignon, Y. (2016). La diagonale se vide ? Analyse spatiale exploratoire des décroissances démographiques en France métropolitaine depuis 50 ans. *Cybergeo : European Journal of Geography*. https://journals.openedition.org/cybergeo/27439.

Ord, J.K., & Getis, A. (2010). Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application. *Geographical Analysis* 27(4), pp. 286–306.

Preston, P., Cawley, A., & Metykova, M. (2007). Broadband and rural areas in the EU: From technology to applications and use. *Telecommunications Policy* 31(6-7), pp. 389–400.

Samarajiva, R., & Waidyanatha, N. (2009). Two complementary mobile technologies for disaster warning. *Info 11*, pp. 58–65.

Sillem, S., Jagtman, H.M., & Ale, B.J.M. (2006). *Using Cell Broadcast in Citizens Warning: Characteristics of Messages* (PSAM-0236). In Proceedings of the Eighth International Conference on Probabilistic Safety Assessment & Management (PSAM), ASME Press, pp. 152–160.

Udu, N. (2009). Mobile Cell Broadcasting for Commercial Use and Public Warning in the Maldives. 43p.

Wiersma, J.W.F., Jagtman, D.H.M., & Ale, B.J.M. (2008). Report on the use of cell broadcast as a citizen alert system. 23p.

Wobbrock, J.O., Findlater, L., Gergle, D., & Higgins, J.J. (2011). The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only ANOVA procedures. In Proceedings of the 2011 Annual Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '11, Vancouver, BC, Canada: ACM Press, pp. 143-146.