

Livre blanc

# Résilience des réseaux cellulaires en soutien à la résilience des réseaux électriques



En collaboration avec :

**ENEDIS**

**orange**<sup>TM</sup> **NOKIA**  **EDF** **WAVESTONE**

## Objet du document

L'objectif de ce livre blanc est de **sensibiliser l'ensemble des acteurs de l'écosystème radio mobile sur l'opportunité et la pertinence d'un réseau radio basse fréquence (450MHz ou équivalent) pour offrir une connectivité résiliente** (y compris aux coupures électriques de l'ordre de 48 heures) aux services d'importance essentielle, et en particulier aux acteurs concourant à la maintenance et au rétablissement du réseau électrique.

Concerné au premier chef par cette opportunité, Enedis a exploré ce scénario dans le cadre d'un partenariat de co-innovation avec Nokia, Orange et EDF R&D. Ce livre blanc est le fruit de ces réflexions, mettant en avant les prérequis et défis majeurs, mais également les forces et atouts pouvant être mis à profit pour mettre en œuvre ce réseau radio résilient.

Au-delà de ce mémorandum, Enedis souhaite pouvoir expérimenter ce scénario sur un territoire pilote, dès que les conditions seront réunies, avec l'aide de ses partenaires et d'autres acteurs partageant un intérêt commun dans le but recherché.

---



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>Un besoin de résilience difficile à satisfaire</b>	<b>6</b>
Interdépendance entre réseau électrique et réseau de données.....	6
D'autres usages pour Enedis au-delà du contrôle-commande .....	7
Des usages similaires chez les autres utilities .....	8
(gaz, eau, chaleur...) .....	8
Des usages avec un niveau d'exigences élevé .....	9
<b>Les avantages d'un réseau LTE basse fréquence</b>	<b>13</b>
Des initiatives similaires en Europe et dans le monde .....	13
Une technologie 3GPP pérenne en réponse à la fin de vie du PMR/DMR.....	15
Un écosystème 450 MHz dynamique .....	16
La bande 450 MHz adaptée pour une couverture avec peu d'antennes .....	17
Les atouts d'Enedis pour initier ce réseau .....	17
<b>5 défis majeurs et des pistes de solutions</b>	<b>19</b>
Défi #1 : Disposer de fréquences répondant au besoin .....	20
Défi #2 : Mettre en place une couverture quasi nationale.....	22
Défi #3 : Jouer la complémentarité réseau public / réseau privé .....	24
Défi #4 : Partager les investissements et l'infrastructure.....	26
Défi #5 : Assurer la résilience même en cas d'évènements électriques majeurs .	29
<b>Conclusion</b>	<b>31</b>
<b>Remerciements</b>	<b>32</b>
<b>Glossaire</b>	<b>33</b>

# Introduction

Les réseaux cellulaires 4G/5G sont désormais des supports de connectivités incontournables pour un grand nombre d'usages tant pour le grand public que pour les entreprises. Cet essor a été favorisé par le déploiement sur la quasi-totalité du territoire des réseaux mobiles haut débit en mettant à profit de larges bandes de fréquences activées sur plusieurs dizaines de milliers d'antennes.

Les bandes de fréquences, attribuées aux opérateurs par l'ARCEP, sont avant tout destinées à répondre à des besoins publics essentiels facilitant l'accès aux services de communication pour l'ensemble de la population. Les réseaux publics des opérateurs ont été conçus avant tout pour permettre la connectivité mobile des particuliers, mais sont également un support de connectivité pour des activités tertiaires (mobilité des forces commerciales) ou industrielles (Industrial IoT, mobilité des techniciens...), mutualisant ainsi les coûts et ressources.

L'expansion de certains usages critiques se voit néanmoins contrainte par **l'incapacité de ces réseaux mobiles à offrir un niveau de résilience suffisant**. Ils sont en particulier **sensibles aux pannes électriques**. La résilience aux coupures de courant d'un site radio (point haut portant une antenne) ne dépasse que rarement 30 minutes, et permet avant tout d'éviter un redémarrage intempestif des équipements en cas de coupure courte. La faible proportion des usages à haut niveau d'exigence sur la résilience ainsi que le nombre important de ces sites radio, réduit la capacité à apporter une sécurisation électrique élevée (batteries, redresseurs...) sur chacun d'eux.

Cette limitation de la résilience électrique est particulièrement sensible, pour les réseaux de distribution électrique dont l'interdépendance aux réseaux de données ne fait que croître. Pour y remédier, dans **de nombreux pays européens, les acteurs en charge de la distribution électriques ont mis en œuvre des réseaux cellulaires privés, résilients et basés sur des fréquences basses (autour des 400MHz)** pour garantir la continuité des capacités de pilotage du réseau électrique. Cette démarche s'inscrit souvent dans un objectif d'**augmenter la résilience globale du réseau électrique** en réponse à des risques majeurs et croissants (aléas climatiques, effondrement/black-out, cyber-attaques...) dans un contexte où la dépendance à l'électricité ne fait que s'accroître (numérique, mobilité, industrie).

Nous souhaitons présenter, dans ce document, la possibilité de mettre en œuvre un réseau cellulaire résilient au service de la résilience du réseau électrique métropolitain et éventuellement d'autres services d'infrastructures d'importance essentielle



## Des réseaux mobiles nationaux avec une ingénierie adaptée aux usages des particuliers

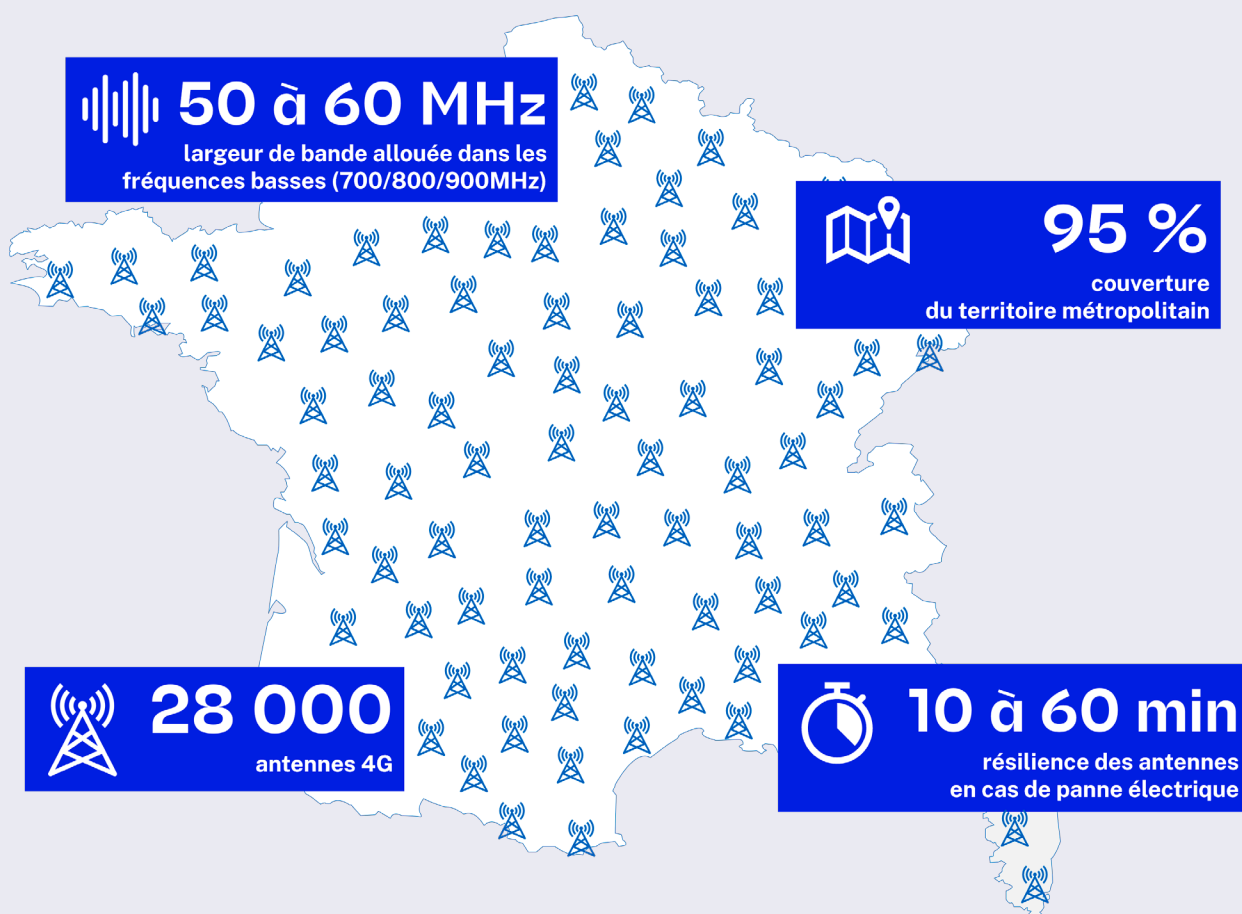


Figure 1 : Ordres de grandeurs sur les infrastructures radio d'un opérateur mobile en France (moyennes calculées sur la base des données publiées par l'ARCEP en juin 2024)

# Un besoin de résilience difficile à satisfaire

## Interdépendance entre réseau électrique et réseau de données

La résilience des réseaux cellulaires est un sujet sensible pour Enedis dans les réflexions autour de **l'interdépendance entre réseau électrique et réseau de données** : chacun a besoin de l'autre pour fonctionner. **Cette interdépendance s'accroît avec la modernisation du réseau électrique** qui doit continuer à équilibrer « offre » et « demande » d'électricité à chaque instant dans un contexte de montée en puissance des productions d'énergies renouvelables (variables et diffuses sur tout le territoire) et des nouvelles consommations (véhicules électriques, électrification des activités industrielles). Cette évolution nommée SmartGrid, nécessite une intelligence accrue des nœuds du réseau électrique et leur contrôle à distance, qui **dépend des moyens de communications disponibles**.

**Enedis s'appuie déjà fortement sur les réseaux cellulaires** pour le contrôle de son réseau au niveau des postes moyennes/basses tensions, et également pour le comptage.

**Cette tendance s'accroît avec la fin de vie du réseau cuivre**, disposant d'un maillage très capillaire, contrairement au réseau fibre dont le maillage en zone rurale est nettement moins dense. La complexité et les coûts d'extension du réseau fibre sont souvent d'un facteur 10 en comparaison avec la mise en place d'une connectivité radio s'appuyant sur la couverture existante du réseau cellulaire.

Malheureusement, la substitution des raccordements cuivre par des connectivités 4G/5G induit une résilience plus faible aux pannes électriques. **Cette tendance observée par les agences de conduite du réseau Enedis** a un impact sur **la disponibilité de leurs capacités de pilotage** (système SCADA) en particulier lors des incidents (coupure d'une ligne moyenne tension, tempête...) pendant lesquels ce pilotage est essentiel au rétablissement du service.

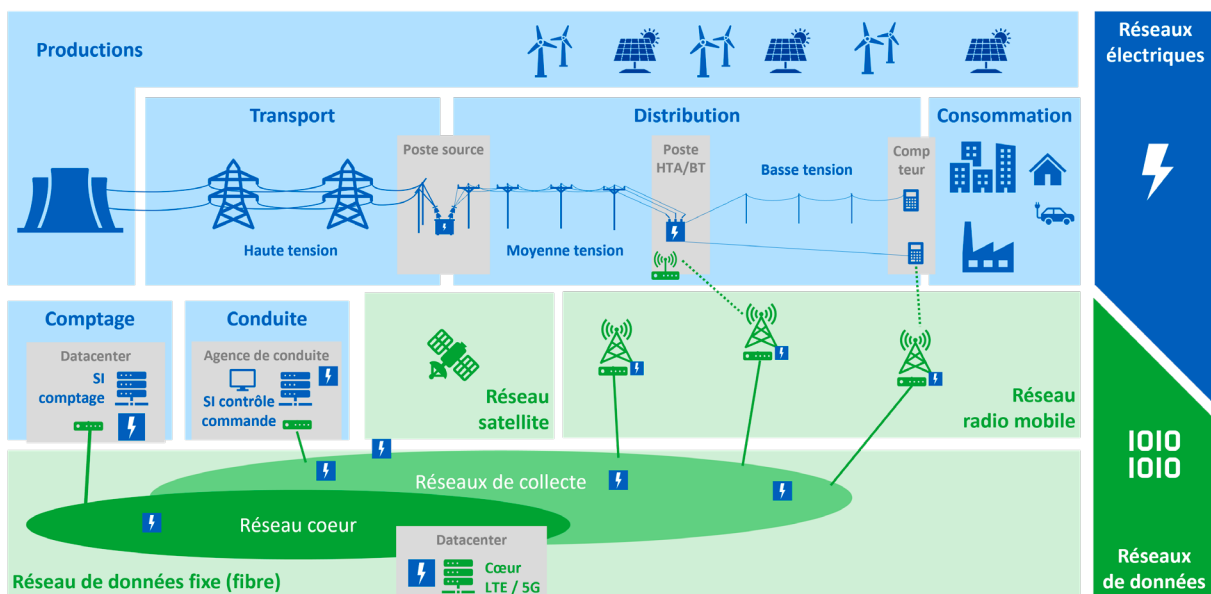


Figure 2 : Interdépendance des réseaux électriques (bleu) et des réseaux de données (vert)



# D'autres usages pour Enedis au-delà du contrôle-commande

## Pallier l'obsolescence des solutions « radio de crise »

Enedis fait déjà usage d'un réseau radio en technologie DMR (Digital Mobile Radio) en bande étroite dans les fréquences de 70 MHz. Ce réseau nommé SOMERO est déjà utilisé pour le pilotage de certains organes de manoeuvre télécommandés (OMT) et apporte également un service « voix de crise » permettant aux agences régionales de conduite d'Enedis de garder un canal de communication avec les techniciens sur le terrain en charge de rétablir le réseau électrique, quand les autres moyens de communication sont défaillants (notamment téléphonie mobile). Ce réseau couvre la quasi-totalité du territoire métropolitain à l'aide de plus d'un millier d'émetteurs mis en œuvre par Enedis avec une résilience de 48 heures.

Néanmoins, la technologie DMR est en voie d'obsolescence. Cette fin de vie s'accélère au fil des bascules des technologies PMR/DMR vers les technologies 4G/LTE initiées par de nombreux acteurs et utilisateurs de services de communications critiques<sup>1</sup>.

Par ailleurs, la technologie DMR en bande étroite (12,5 kHz de largeur de bande) est très limitée en termes de débit (généralement 9,6 kbps) et ne permet pas le transport de flux IP de manière native. Si elle peut être suffisante pour quelques communications voix ou l'envoi d'ordre simple, cette technologie n'est plus adaptée pour répondre au contrôle d'équipements intelligents déployés sur le réseau basse tension et aux exigences de cybersécurité. Les mécanismes de sécurisation des communications, les outils de surveillance et de détection d'attaques, mais surtout les mises à jour de firmwares nécessaires à la gestion des vulnérabilités découvertes, nécessitent souvent des débits soutenus de 0,5 voire 1 Mbps.

Au-delà des flux spécifiques au contrôle-commande du réseau électrique, la mise en place d'un réseau radio résilient offrirait une solution de remplacement pour accompagner à plus long terme la fin de vie du réseau SOMERO.



*« La mise en œuvre d'un réseau télécom résilient aux pannes électriques pour le pilotage du réseau électrique est importante pour les opérateurs télécoms. En effet, il y a une forte interdépendance des infrastructures du secteur télécom et de la distribution d'électricité et ce réseau télécom résilient permettra in fine de minimiser les temps d'indisponibilité des infrastructures télécoms en situation de crise climatique notamment. »*

*Nicolas BIHANNIC - ORANGE*

<sup>1</sup> Par exemple : le projet RRF (Réseau Radio du Futur), sous la tutelle du Ministère de l'Intérieur, vise à basculer les usages PMR des services de sécurité et d'urgence (police, gendarmerie, pompiers, SAMU, administration pénitentiaire, douanes, OIV, ...).

## Diversifier les connectivités pour les données de comptage

Enedis utilise aussi les réseaux mobiles cellulaires pour le comptage. En France, les compteurs particuliers Linky utilisent la technologie dite « courant porteur en ligne » sur la ligne électrique basse tension pour véhiculer les données jusqu'à un concentrateur situé en poste de distribution HTA/BT. Mais ces concentrateurs ainsi que les compteurs de forte puissance (pour entreprises et industries) utilisent les réseaux mobiles pour remonter les données de comptage vers les Datacenters. Le besoin de dispo-

nibilité de la connectivité s'accroît avec les nouvelles fonctionnalités portées par les compteurs (suivi de plus en plus fin des courbes de charges, ordre d'effacement...).

La disponibilité d'un réseau radio résilient en complément des réseaux cellulaires commerciaux actuels permettrait de compléter la couverture de certaines zones blanches et d'améliorer la disponibilité globale de la chaîne communicante du comptage.

## Des usages similaires chez les autres utilities (gaz, eau, chaleur...)

Des besoins et usages similaires sont recensés pour d'autres utilities. En Allemagne par exemple, en plus de la gestion du réseau électrique, le réseau mis en œuvre par 450Connect permet la gestion des systèmes de contrôle de la pression et le stockage du gaz. En ce qui concerne l'eau, il permet la surveillance des stations de pompage et des réseaux d'eau dans le pays. Il

est également utilisé dans les usines de traitement des eaux usées. Dans le domaine du chauffage urbain, il permet le contrôle des actifs et des vannes. De plus, il assure la gestion des compteurs intelligents et télé-relevés pour le gaz, l'eau et le chauffage urbain, garantissant une surveillance et un contrôle précis.



« Le Groupe EDF fait face à une forte demande des besoins internes de connectivité pour des besoins IoT critiques : **dans le domaine du Smart-Grid** (pour le contrôle-commande du réseau électrique, pour les communications de crise avec les techniciens d'intervention et d'une manière générale pour contribuer à la résilience du réseau électrique), mais également dans le **domaine de la production hydraulique** (la surveillance des prises d'eau, le réglage de vannes, le suivi de la température de l'eau dans les conduites forcées, la protection des travailleurs isolés, qui nécessitent des besoins d'instrumentation et de connectivité sur les vallées hydrauliques en amont et en aval) et enfin pour la **production d'électricité thermique et nucléaire** durant les phases d'exploitation ainsi que durant les périodes de construction de ces moyens. »

Patrick COUDRAY - EDF R&D



## Critical use cases of utilities

### Voice, Smart Grid and Smart Metering communication




		
<p><b>Critical and operational communication</b></p>	<p><b>Highly critical OT communication</b></p>	<p><b>Critical M2M communication</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Switching procedures               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Reliable voice communication</li> <li>– Precise switching instructions</li> </ul> </li> <li>▪ Emergency communication               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Storm situations or blackout</li> </ul> </li> <li>▪ Users:               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Utilities: technical field force, control rooms, management</li> <li>– Municipalities: crisis teams</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Power:</b> Connection of substations (also as backup), remote control systems, local network stations, generation systems, redispatch, controllable consumers/prosumers</li> <li>▪ <b>Gas:</b> Gas pressure control systems, gas storage</li> <li>▪ <b>Water:</b> Wells, waterworks, pumping stations, pressure boosting systems, elevated tanks, valves, network monitoring systems</li> <li>▪ <b>Waste water:</b> Sewage treatment plants, pumping stations</li> <li>▪ <b>District heating:</b> Control assets and valves</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Smart Meter Gateways and FNN Switchboxes for PV, EV and HP</li> <li>▪ Regular measurement meters</li> <li>▪ Remotely readable meters (gas, water, district heating)</li> <li>▪ Critical sensors</li> <li>▪ Public street lighting</li> </ul>
<p><b>450connect</b></p>	<p>Dublin, 29.05.2024</p>	<p>450alliance Dublin Conference</p>

Figure 3 : Exemples de cas d'usages pour lesquels le réseau 450 MHz est utilisé en Allemagne

## Des usages avec un niveau d'exigences élevé

Afin de mieux évaluer la pertinence des solutions de communications, il convient de quantifier les performances attendues pour chacun de ces usages. Plusieurs indicateurs de performances sont nécessaires pour traduire ces exigences.

- + **Résilience (électrique)** : elle traduit la durée pendant laquelle le système de communication doit rester opérationnel alors que la zone est affectée par une coupure électrique. Il s'agit donc de l'autonomie électrique apportée au système au travers de batterie, générateur, ... Compte tenu des cas de crise envisagés (aléas climatiques, cyber-attaques...), une double adduction électrique n'est en première approche pas considérée comme un moyen de résilience suffisant en particulier pour les systèmes en proximité de la crise (même région).
- + **Fiabilité** : elle traduit la disponibilité moyenne attendue du système de communication avec une capacité nominale.
- + **Débit / équipement** : il traduit le débit utile attendu pour un équipement unitaire raccordé au réseau. En fonction de l'usage, le débit attendu peut être différent en voie montante (de l'équipement vers le réseau) ou en voie descendante (du réseau vers l'équipement). On prend ici pour hypothèse une cellule couvrant 100 équipements, dans une logique de réseau cellulaire basse fréquence. Il est entendu que la taille d'une cellule est particulièrement variable selon les technologies, les fréquences utilisées et les puissances émises.
- + **Débit / cellule** : il traduit le débit utile attendu pour supporter l'ensemble des communications des équipements présents au sein de la cellule et partageant une ressource commune limitant ce débit (ex : fréquence partagée par les utilisateurs au sein d'une cellule d'un réseau radio, mais également pour un réseau satellitaire).
- + **Latence** : elle traduit le délai de propagation maximum attendu des données au sein du réseau, pour un aller-retour entre l'équipement connecté et un point central à l'échelle nationale. Ce délai doit tenir compte du « temps de parole » alloué aux divers équipements au sein du réseau et pour certains des « temps de sommeil » (pour des besoins d'économie d'énergie).

Dans le tableau ci-dessous, les niveaux d'exigence sont définis pour chacun de ces indicateurs et pour chacun des cas d'usage évoqués ci-dessus. L'objectif de ce tableau est de fournir un crible d'exigences permettant d'évaluer la capacité d'un système de communication à soutenir les différents usages, en fonction de ces performances.

Au sein de ce crible, l'exigence qui ressort comme la plus difficile à atteindre en regard des technologies et règles d'ingénierie actuelle est **la résilience à une coupure électrique**. En effet, là où les réseaux cellulaires (conçus principalement pour les usages du grand public) offrent au mieux une résilience d'une heure, **les usages du contrôle-commande et de communication de crise requièrent une durée de 48 heures**, correspondant à la durée d'utilisation du moyen de communication pour permettre aux équipes Enedis de réaliser les opérations de rétablissement de l'électricité (commandes à distance, échange avec les équipes sur le terrain) de manière efficace et sécurisée, suite à un incident majeur.

	Résilience (3)	Fiabilité	Débit / cellule	Débit / device	Latence
Contrôle Commande SCADA	<b>48h</b>	99.99%	1 Mbps <b>▲▼</b>	<100 kbps <b>▲▼</b>	100-200 ms
Communication de crise (1)	<b>48h</b>	99.99%	600 kbps <b>▲▼</b>	30 kbps <b>▲▼</b>	200 ms
Mise à jour (2)	N/A	99%	8 Mbps <b>▼</b>	0,5 - 1 Mbps <b>▲▼</b>	200 ms
Comptage	N/A	99%	1 Mbps <b>▲▼</b>	300 Kbps <b>▲▼</b>	100-200 ms

Niveau de l'exigence en regard des technologies radio existantes **Standard** **Moyen** **Élevé** **Très élevé**

**Figure 4 : Crible d'exigences pour les usages envisagés**

(1) Communication VoIP ou VoLTE à 30kb/s (codec G.722.2). 20 communications simultanées sur une cellule.

(2) Mise à jour de 200 Mo devant être distribuée en 6h (une nuit) sur un maximum de 100 équipements rattachés à la même cellule. Un transfert unitaire ne devant pas durer plus d'une heure.

(3) La durée de résilience s'entend comme la durée pendant laquelle la connectivité télécom est maintenue malgré un évènement majeur affectant l'alimentation électrique sur une certaine zone géographique. Les évènements suivants doivent être pris en compte :

- + Pannes électriques courantes (perte d'un départ HTA), avec perte de l'alimentation électrique sur environ 1/60e de département.
- + Aléas climatiques et autres catastrophes naturelles, avec perte d'alimentation électrique sur plusieurs départements (ex : la tempête Ciaran de novembre 2023, Enedis a indemnisé plus de 1 million de foyers coupés pendant plus de 5 heures, dans plus de la moitié en Bretagne, soit plus d'un quart des foyers bretons)
- + Blackout électrique total sur une région Enedis



## Les limitations des solutions actuelles

En lien avec l'écosystème Télécoms (opérateurs et équipementiers), Enedis suit l'évolution des différentes technologies de connectivité et les services télécoms opérés pour identifier les solutions les mieux à même de répondre au crible d'exigences ci-dessus avec un niveau de couverture national.

Mais dans un contexte d'obsolescence des technologies utilisées de manière historique, en particulier les liaisons cuivre et la radio PMR/DMR, il devient de plus en plus difficile de disposer de solutions capables d'atteindre ce niveau d'exigences.

Le tableau ci-dessous passe au crible des exigences métiers ci-dessus les technologies et services télécoms proposés par les opérateurs.

Services / Technologies	Résilience	Fiabilité	Débit/cel- lule	Latence	Autres contraintes
Rappel des exigences >	48h	99.99%	1 à 8 Mbps	100-200 ms	Capacité de déploiement à l'échelle. Mobilité pour les communications de crise
<b>Cellulaire public (4G/5G)</b>					
<b>Cellulaire privé (4G/5G)</b>					Fréquence permettant d'offrir une couverture nationale avec un débit suffisant.
<b>IoT (ex : LoRa, Nb-IoT)</b>					
<b>Fibre (FTTO / FTTH)</b>					Adduction fibre de 100.000 points en zone rurale Pas de mobilité possible
<b>Satellite GEO (VSAT)</b>					Implantation d'antenne parabolique
<b>Satellite orbite basse (LEO)</b>					Facteur de forme encore trop volumineux des antennes. Solution souveraine

Capacité à atteindre les exigences



Figure 5 : Capacité des solutions actuelles à répondre aux besoins métiers

Les solutions filaires (fibre FTTO, FTTH) permettent d'atteindre les performances requises. La résilience reste très difficile à atteindre car elle nécessite pour l'opérateur de renforcer la survivabilité des équipements actifs dans de nombreux NRO (Nœuds de Raccordement Optique) en cas de panne électrique. Mais c'est la **capacité à faire arriver la fibre sur près de 100.000 sites**, majoritairement en zone rurale (et avec des déploiements/mouvements fréquents) qui disqualifie cette solution. Par ailleurs, les solutions filaires ne répondent pas au besoin de mobilité pour les communications de crise.

Les solutions cellulaires semblent adaptées

d'un point de vue technologique et performance. Malheureusement, **l'ingénierie des réseaux cellulaires « publics », conçus pour des usages « grand public », ne peut prendre en compte le niveau de résilience attendu.** Cela demanderait à l'opérateur d'accroître d'un facteur 50 ou plus les capacités des batteries sur plus de 28.000 sites radio.

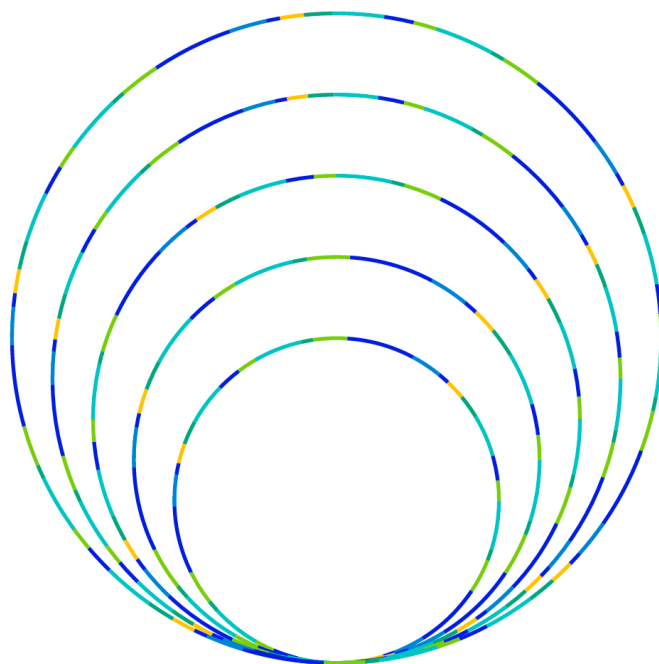
Les solutions IoT (NB-IoT ou LoRaWAN) posent des soucis similaires en termes de résilience tant qu'elles sont basées sur des infrastructures publiques. **L'usage de technologie « bande étroite » peut permettre de limiter un peu la consommation énergétique mais pas suffisamment** pour

compenser les facteurs d'échelle évoqués ci-dessus. Par ailleurs, les compromis de ces technologies entre d'une part les performances (débit et latence) et d'autre part la couverture et l'efficacité énergétique peuvent **rendre plus difficile à atteindre les exigences de performances.**

**Les solutions satellitaires sont intéressantes pour répondre aux besoins de résilience.** En effet, les relais satellite ne sont pas dépendants des incidents sur le réseau électrique. Il convient d'assurer la résilience d'un petit nombre de station terrestre (2 ou 3 suffiraient à l'échelle nationale). Les besoins de performances en latence seraient difficiles à tenir sur des offres VSAT basées sur des satellites géostationnaires. En revanche, **les services apportés par les nouvelles constellations en orbite moyenne (MEO) ou basse (LEO) permettent de satisfaire les performances attendues.** Par contre, **le facteur de forme actuel des antennes paraboliques ou planes** (technologie « phased array »), même s'il a fortement diminué (ex : 30x26cm pour la petite dernière Starlink Mini), **reste rédhibitoire pour une installation sur un poste basse tension** (encombrement, horizon dégagé, protection face aux intempéries et au vandalisme). Les évolutions des solutions

satellitaires restent à observer, notamment la convergence avec les réseaux cellulaires (« 5G NTN » et « direct-to-cell ») et **l'émergence de service résilient et souverain**, notamment avec le projet européen IRIS<sup>2</sup> dont le marché vient d'être récemment attribué au consortium regroupant SES, Eutelsat et Hispasat. Néanmoins, à date, rien ne laisse présager la disponibilité dans un horizon proche d'une solution répondant au crible d'exigences, avec une antenne présentant un encombrement similaire aux solutions cellulaires.

Finalement, **aucun service télécom sur étagère ne permet de répondre aux exigences posées.** Enedis et ses partenaires étudient par conséquent une variante de la solution cellulaire permettant de lever les limitations sur la résilience et de s'affranchir de l'interdépendance entre réseau électrique et réseau de données. Afin de mieux cibler les investissements sur la résilience électrique d'un réseau cellulaire, il est envisagé **un réseau privé avec des antennes dédiées.** Naturellement pour y parvenir, il convient d'utiliser **une fréquence basse** pour permettre une couverture nationale avec un minimum de points hauts. La suite de ce document présente cette solution envisagée et analyse les défis qu'elle pose.





# Les avantages d'un réseau LTE basse fréquence

La piste envisagée d'un réseau cellulaire basse fréquence résilient n'est pas la résultante d'une solution par défaut, en l'absence d'autres technologies adaptées. Elle est soutenue par des atouts concrets qui vont être développés ci-dessous : des initiatives similaires dans d'autres pays, une technologie 3GPP mature, pérenne et évolutive, des fréquences 450 MHz permettant une couverture étendue avec peu de points hauts et bénéficiant d'un écosystème dynamique.

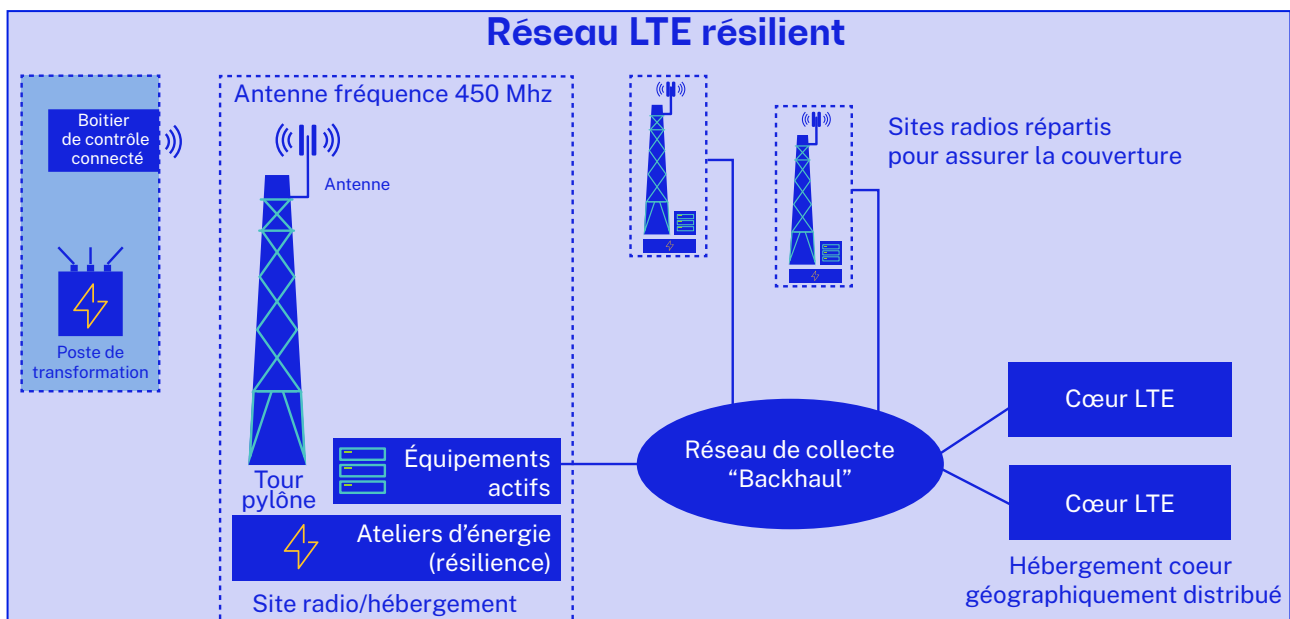


Figure 6 : Vision d'ensemble d'un réseau LTE 450 MHz résilient

## Des initiatives similaires en Europe et dans le monde

Les besoins d'Enedis d'une solution de connectivité résiliente se retrouvent chez d'autres distributeurs d'électricité à l'international, ou pour d'autres réseaux d'infrastructures (gaz, eau, route, rail...). **Un nombre important de ces acteurs se tournent naturellement vers des réseaux cellulaires basse fréquence spécialisés.** La bande de fréquence des 450 MHz est souvent retenue comme le meilleur compromis pour assurer à la fois couverture, résilience, performance et facilité de déploiement.



« L'utilisation de la technologie sans fil 4G/5G avec 410-450 MHz est en train de devenir le principal choix des entreprises de services publics à travers l'Europe. Certains pays ont déjà alloué cette partie du spectre aux besoins des services publics, et les premières expériences et leçons apprises sont déjà disponibles dans la communauté. L'adhésion à un concept déjà développé et testé dans d'autres pays permettra de bénéficier du savoir-faire accumulé. Il contribuera également à renforcer et à faire évoluer l'écosystème existant en ce qui concerne le développement de nouvelles fonctionnalités ou de cas d'utilisation. »

Régis Picard - NOKIA

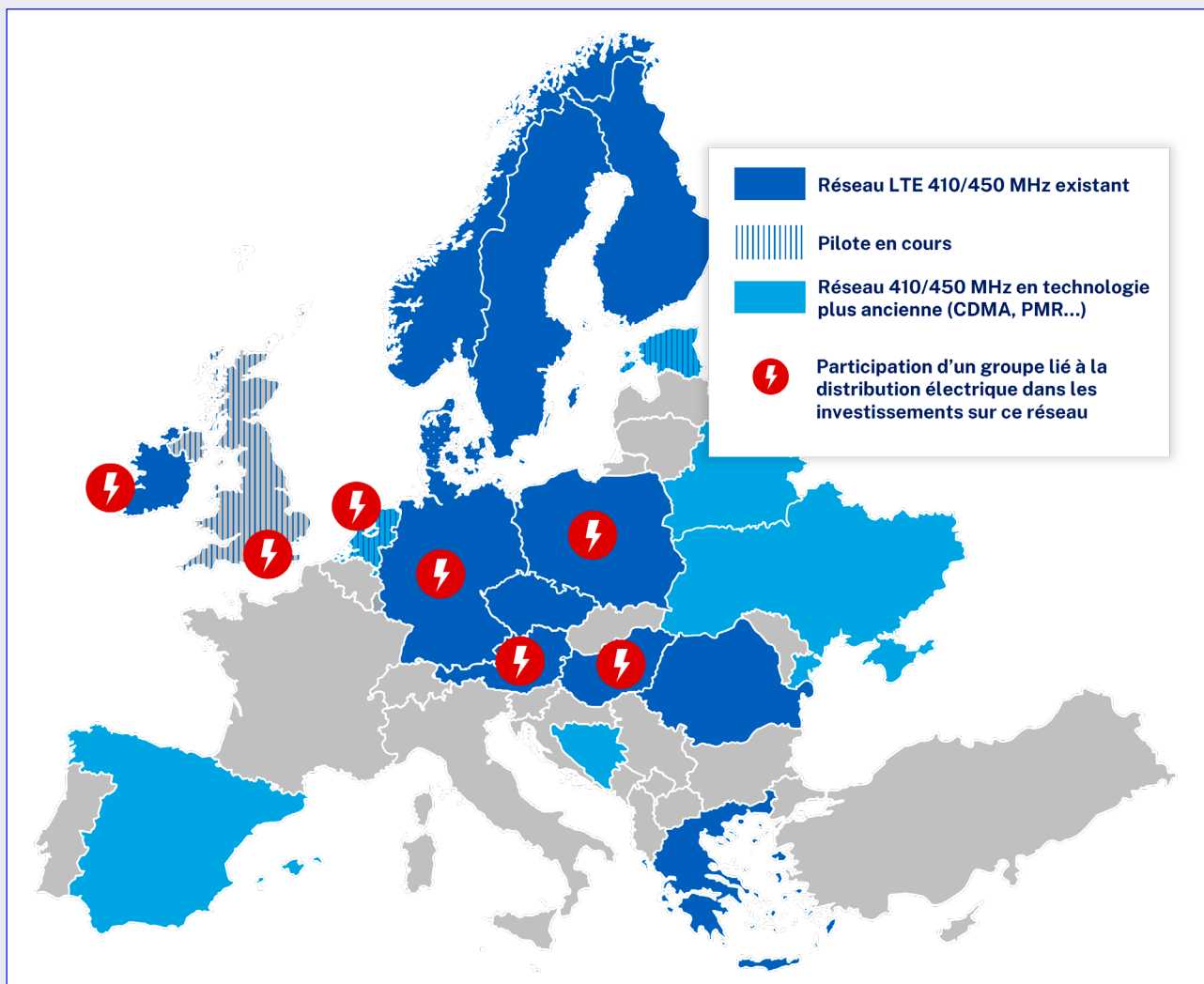


Figure 7 : Cartographie des réseaux 410/450 MHz européens (sources : 450 MHz Alliance & Wavestone)

Pays	Entité en charge du réseau et des fréquences	Fréquences utilisées	Technologies utilisées	Usages
Allemagne	<b>450 Connect</b> , groupement incluant <b>Alliander, E.ON</b> et 2 consortiums d'utilités	450MHz (B72)	LTE et LTE-M	> Contrôle-commande > Communication de crise > Comptage
Autriche	<b>ArgoNET</b> , dont 34% est détenu par <b>Energie Steiermark</b>	450MHz (B72)	LTE et CDMA	> Contrôle-commande > Communication de crise > Comptage
Hongrie	<b>MVM Net</b> , détenu par <b>MVM Group</b>	450 MHz (B31)	LTE	> Comptage > Services publics
Irlande	<b>ESB Networks</b> , détenu par <b>ESB Group</b>	410 MHz (B87)	LTE	> Communication de crise > Comptage
Pays-Bas	<b>Utility Connect</b> , détenu par <b>Alliander</b> et <b>Stedin</b>	450MHz (B72)	CDMA, puis LTE à partir de 2026	> Comptage > Contrôle-commande puis avec le LTE > Communication de crise
Pologne	<b>PGE Systemy</b> , détenu par <b>PGE Group</b>	450 MHz (B31)	LTE	> Contrôle-commande > Communication de crise > Comptage
Royaume Uni	<b>National Grid</b>	410MHz (B87)	LTE (pilote en cours)	> Contrôle-commande > Communication de crise > Comptage

Figure 8 : Liste des réseaux LTE 450 MHz européens menés par un acteur de la distribution électrique

L'association 450 MHz Alliance, qui regroupe les acteurs clés de l'écosystème des réseaux 450 MHz dans le monde, identifie **la verticale « Utility » comme le premier usage de réseau en 450 MHz**, devant les réseaux dédiés à la sécurité et aux secours.

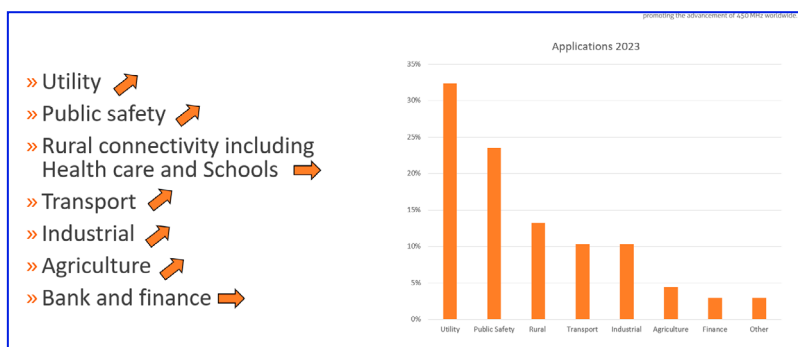


Figure 9 : Principaux secteurs d'utilisation des technologies radio en 450 MHz (source : 450 MHz Alliance)

## Une technologie 3GPP pérenne en réponse à la fin de vie du PMR/DMR

Le choix de la technologie cellulaire et en particulier du LTE répond au besoin de s'appuyer sur un standard fiable et durable.

Contrairement aux technologies PMR/DMR arrivant en fin de vie (plus de développement des standards, déclin du marché et des acteurs positionnés sur ce marché), la technologie radio cellulaire développée par le 3GPP, donne un gage de pérennité et d'évolutivité, nécessaire pour lancer des investissements sur des réseaux dédiés à vocation industrielle, dont le cycle de vie est susceptible de s'étendre sur 20 ou 30 ans.

Les transitions entre les différentes générations (3G, 4G et 5G) font l'objet d'une attention particulière au niveau normalisation et leur opérationnalisation a été démontrée tant sur les réseaux publics que privés.



« Des avantages supplémentaires résulteront de la combinaison des avantages économiques des bandes basses fréquences avec les possibilités techniques d'un système de communication sans fil basé sur des normes internationalement reconnues (par exemple 3GPP). Il est reconnu que plusieurs entités ayant une riche histoire dans l'industrie de la communication sans fil contribuent à définir les spécifications 3GPP. Les systèmes basés sur le 3GPP intègrent les dernières mises à jour de la technologie sans fil, ce qui est également justifié d'un point de vue financier. Ils sont flexibles, fiables et compatibles avec un large éventail de cas d'utilisation. Au fil des ans, de multiples développements ont été introduits dans les spécifications 4G et 5G pour répondre aux spécificités des bandes de fréquences autour de 450 MHz. »

Régis Picard - NOKIA

Côté fonctionnalités, le LTE a démontré également la capacité à reprendre les applications spécifiques des PMR, comme le « push-to-talk », tant sur des emprises locales (aéroports, ports) que nationales (sécurité publique).

# Un écosystème 450 MHz dynamique

L'association nommée **450 MHz Alliance**, fondée en 2014, regroupe des utilisateurs du secteur et des acteurs de l'écosystème télécoms, pour promouvoir la technologie et les usages des fréquences 450 MHz et faire converger les standards pour obtenir des économies d'échelle.

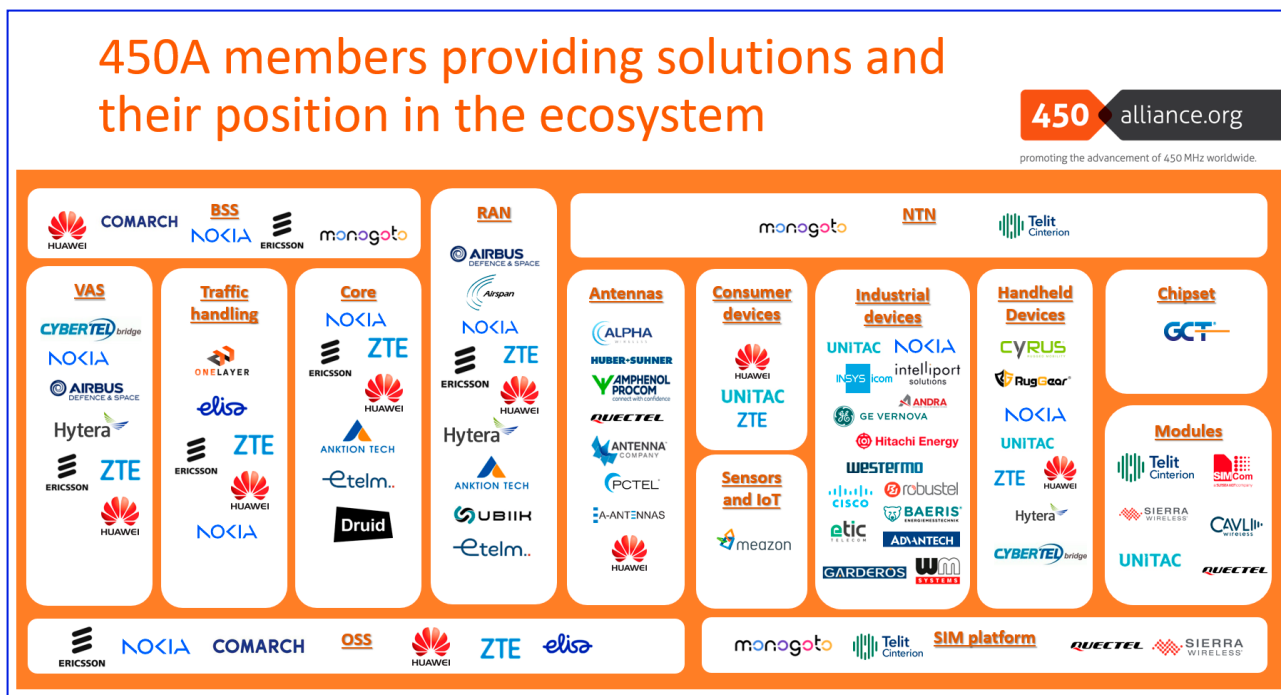


Figure 10 : Cartographie des acteurs technologiques membres de 450MHz Alliance (source : 450 MHz Alliance)

Les principaux acteurs de l'écosystème radio-mobilité sont présents : équipementiers (radio, cœur, terminaux, chipset...), opérateurs, intégrateurs... Mais, on y retrouve également un certain nombre d'acteurs de l'écosystème de la distribution électrique, notamment : 450Connect (Allemagne), Iberdrola (Espagne), ESB (Irlande), GE Vernova (Etats-Unis), PGE (Pologne), UtilityConnect (Pays-Bas).

Selon l'association GSA (the Global mobile Suppliers Association), il existe **déjà plus de 260 types de terminaux distincts compatibles LTE en 450 MHz**, avec une croissance annuelle estimée à 50%. Les gammes de produits développés sont cohérentes avec les usages évoqués précédemment : routeurs 4G, compteurs (électricité, gaz, eau...) et modules (permettant une intégration dans des équipements industriels).

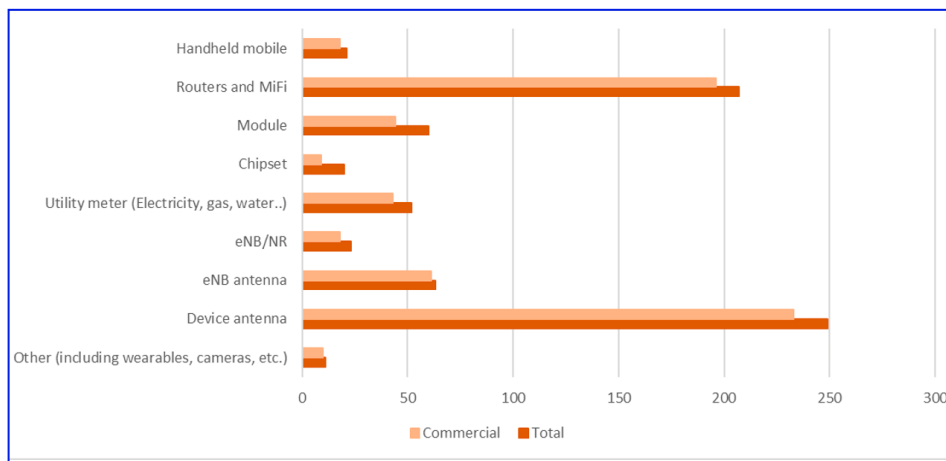


Figure 11 : Inventaire des produits compatibles LTE 450 MHz (source 450 Alliance – avril 2024)



**En France, l'écosystème semble également favorable au développement des réseaux LTE en 450 MHz**, comme en témoignent les réponses à la consultation publique « Préparer le futur des réseaux mobiles » lancée par l'ARCEP en mai 2022. A la question 82 : « Confirmez-vous la nécessité d'introduire la technologie LTE dans la bande 450 MHz ? », les réponses sont très majoritairement positives (11 sur 12) chez différents types d'acteurs : utilisateurs (AGURRE, EDF, EUTC), opérateurs (Alsatis, HubOne, Orange), équipementiers télécoms (Ericsson, Nokia), recherche (B<>COM), TowerCo (Cellnex) et la 450 Alliance.

## La bande 450 MHz adaptée pour une couverture avec peu d'antennes

Si les fréquences 410 ou 450 MHz sont privilégiées dans de nombreux pays pour la mise en œuvre de réseaux radio résilients à destination des utilities, c'est que **cette bande dispose d'atouts particulièrement intéressants**, notamment en regard des autres bandes basses (700, 800 ou 900 MHz) et encore davantage par rapport aux fréquences moyennes (1800, 2100, 2600 MHz) :

- + **Une propagation des ondes sur de longues distances** (plus de 100 km en conditions idéales : hauteur de l'antenne à plus de 30m, puissance d'émission à 40W et sans obstacles) : cela permet d'assurer une bonne couverture avec un nombre minimum d'antennes et ainsi d'investir davantage sur la résilience des infrastructures supportant chacune de ces antennes (points hauts, batteries / ateliers d'énergie, réseau backhaul...).
- + **Une meilleure pénétration à l'intérieur des bâtiments** : c'est un atout important pour les communications de crise avec des agents sur le terrain se trouvant dans des tunnels ou sous-sols de bâtiments, mais également pour les compteurs ou autres objets connectés n'ayant pas un accès direct à l'extérieur.



« L'adoption d'une technologie de communication sans fil basses fréquences et basée sur les spécifications 3GPP (par exemple LTE ou 5G) offre des avantages dans de multiples dimensions, notamment économiques, techniques ou environnementales.

*Les fréquences de la bande 450 MHz offrent une large couverture extérieure et une excellente puissance de signal intérieur. En appliquant ces caractéristiques au profil de trafic des services publics d'importance vitale, on pourra observer une réduction significative du nombre de sites radio nécessaires, de la quantité d'équipements à déployer, des efforts d'installation et de la durée de mise en œuvre, contribuant ainsi positivement au coût total de possession (TCO) d'un tel réseau. »*

*Régis Picard - NOKIA*

## Les atouts d'Enedis pour initier ce réseau

Enedis dispose par ailleurs de certains accélérateurs pour mettre en place un tel réseau résilient, en capitalisant sur son réseau DMR nommé SOMERO qui supporte déjà les communications de crises et le contrôle-commande pour une partie des organes de manœuvre sur la basse tension.

Ce réseau, bâti initialement en PMR (analogique) sur la base d'une fréquence 70 MHz et migré en DMR (digital) entre 2017 et 2020, s'appuie sur un **maillage de plus de 1000 points hauts**. Les infrastructures de ces points hauts pourraient être réutilisées ou mutualisées pour contribuer à la construction d'un réseau résilient LTE 450 MHz, avec notamment :

- + Des **ateliers d'énergie** déployés et maintenus par Enedis et dimensionnés pour permettre une résilience d'environ 48 heures du réseau DMR SOMERO en cas de panne d'alimentation électrique.
- + Un réseau (**service MPLS souscrit auprès d'Orange**) connectant l'ensemble des points hauts et assurant la collecte des flux radio (« backhaul ») jusqu'aux cœurs DMR sur chaque région.

Une mise à niveau de ces infrastructures sera sans doute nécessaire pour répondre aux exigences des équipements LTE, notamment l'accroissement des capacités des batteries (un projet de renouvellement est prévu) et l'upgrade des accès au backhaul. La préexistence de ces infrastructures et leur maîtrise par Enedis (contrats, maintenance, capacité d'intervention pour des actes de proximité) constituent une base de départ solide pour construire un nouveau réseau radio résilient.

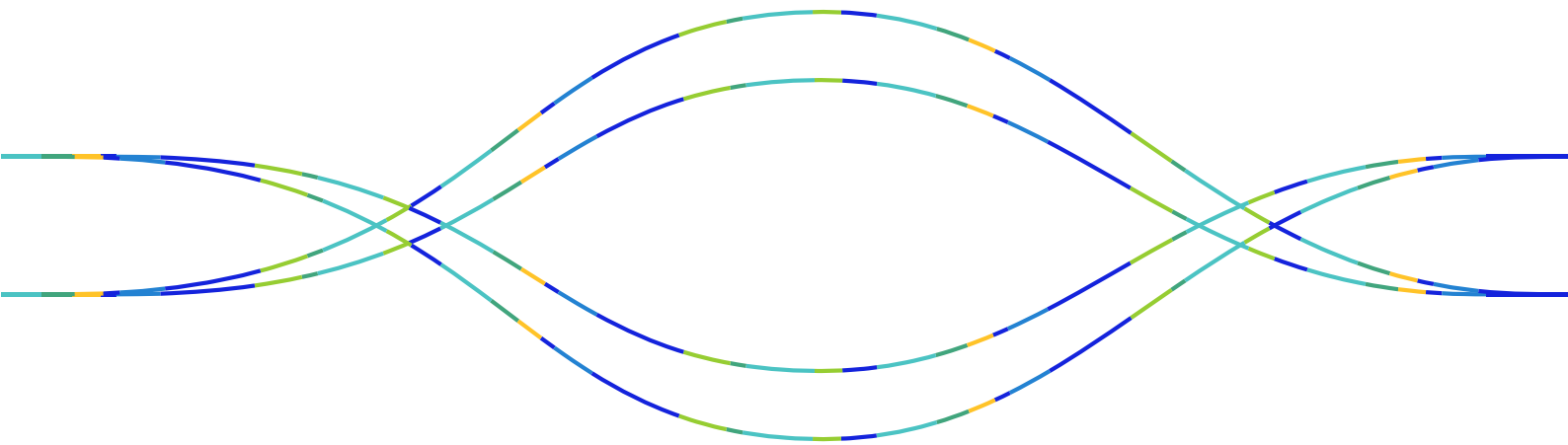




# 5 défis majeurs et des pistes de solutions

Si les réseaux cellulaires basses fréquences apparaissent comme une solution efficiente et pérenne pour répondre aux exigences de résilience et de performances requises, leur mise en œuvre nécessite de relever un certain nombre de défis. La suite du document propose d'étudier les 5 principaux défis identifiés.

<b>Défi #1 :</b>	Disposer de fréquences répondant au besoin
<b>Défi #2 :</b>	Mettre en place une couverture quasi nationale
<b>Défi #3 :</b>	Jouer la complémentarité réseau public / réseau privé
<b>Défi #4 :</b>	Partager les investissements et l'infrastructure
<b>Défi #5 :</b>	Assurer la résilience même en cas d'évènements électriques majeurs



## Défi #1 : Disposer de fréquences répondant au besoin

Un prérequis évident est de disposer de fréquences dans les bandes basses et pouvant être utilisées à l'échelle nationale pour construire la couverture radio. La bande de fréquence des 450 MHz est privilégiée par la plupart des pays européens (les exceptions observées sont en Irlande et au Royaume Uni, qui privilégient la bande 410 MHz).

Au niveau réglementation européen, le CEPT a adopté depuis 2016 une décision visant à harmoniser certaines bandes 700 MHz ainsi que les bandes 410 et 450 MHz aux usages BB-PPDR (Broadband Public Protection & Disaster Relief). Néanmoins, les bandes 700 MHz sont privilégiées et les bandes 410 et 450 MHz sont identifiées en complément, car elle ne permettent pas une canalisation en 2x10 MHz nécessaire pour les usages haut-débits attendus.

Chaque pays doit néanmoins mettre en place l'harmonisation en tenant compte des affectations historiques et des besoins spécifiques sur son territoire. En Europe, la majorité des opérateurs ayant mis en œuvre des réseaux LTE 450 MHz se sont vus attribués entre 2x3 et 2x5 MHz.

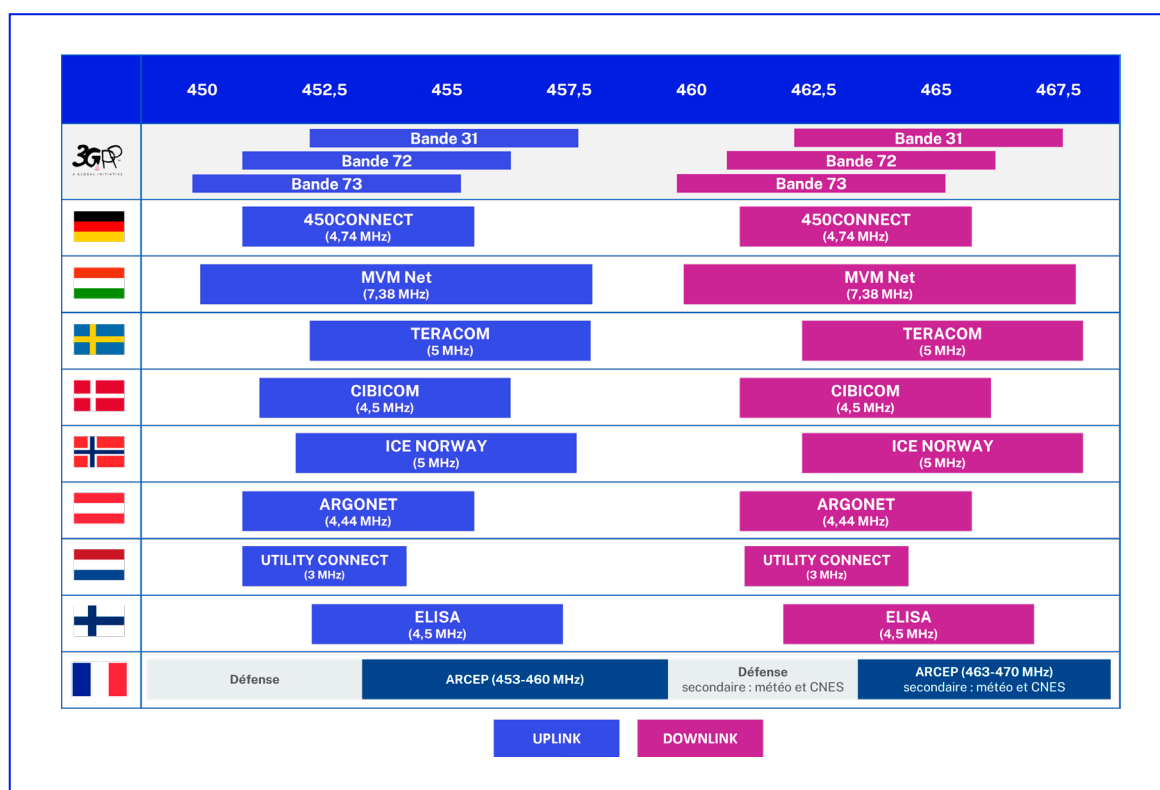


Figure 12 : Allocation des fréquences 450 MHz aux attributaires européens pour la mise en œuvre de réseaux LTE

En France, l'ARCEP est affectataire exclusif principal de 2x7 MHz sur la bande 450MHz (les 2x3 MHz restant étant affectées à l'armée). Cela signifie **une capacité de 2x3 MHz seulement en bande normalisée B72, ou 2x4,5 MHz en bande B31**. Par ailleurs le travail d'harmonisation requiert de composer avec les affectataires secondaires (CNES et Météorologie) pour les fréquences dans le sens descendant (460-470 MHz).



Si l'affectation immédiate d'un bloc de 2x5 Mhz utile en B72 ou B31 semble être complexe, il peut être envisagé une **stratégie progressive**, en partant d'un bloc minimum dans un premier temps, pouvant être étendu dans un calendrier à définir. Cette stratégie progressive, est par exemple mise en œuvre aux Pays-Bas, où le gouvernement a décidé en 2024, dans le cadre du passage au LTE du réseau Utility Connect (jusque-là en CDMA), de prolonger la mise à disposition de 2x1,5 MHz, qui seront élargis à 2x3 MHz à partir de 2035 et ce, jusqu'en 2050. Cela permet à l'opérateur d'avoir **la visibilité pour investir et construire une feuille de route** pour le déploiement et l'ouverture des nouveaux services basés sur le LTE.



## Défi #2 : Mettre en place une couverture quasi nationale

Au-delà de la disponibilité des fréquences, pour mettre en œuvre une couverture nationale, il faut mailler le territoire avec des antennes radio. **Le nombre de sites radio est le principal facteur dimensionnant des investissements et coûts de fonctionnement d'un réseau radio**, impactant de manière linéaire le coût des équipements radio (antenne, RRU, BBU...), mais également autres infrastructures requises sur ces sites (hébergement sur le point haut, atelier d'énergie, réseau backhaul...). La bonne estimation et l'optimisation du nombre de sites radio requis est donc un enjeu clé.

Si les opérateurs mobiles déploient près de 40.000 sites radios pour leurs réseaux mobiles 4G, ce nombre peut être fortement réduit par l'usage des fréquences basses 450 MHz. Pour son réseau DMR SOMERO, Enedis a mis en œuvre plus de 1000 sites radio en utilisant une fréquence 70MHz.

Pour estimer ce nombre de sites, Enedis a déjà lancé une première étude théorique sur 2 Directions Régionales : DR Lorraine (regroupant les départements 54 Meurthe et Moselle, 55 Meuse, 57 Moselle et 88 Vosges) et la DR Midi-Pyrénées Sud (regroupant les départements 09 Ariège, 31 Haute Garonne et 32 Gers). Cette étude évalue la couverture des Postes HTA/BT (18 959 en DR Lorraine et 25 682 en DR Midi-Pyrénées Sud) qui sont les principaux points nécessitant une connectivité cellulaire (tant pour le contrôle-commande des organes de manœuvre du réseau électrique que pour les concentrateurs du comptage).

Il résulte de cette étude, que le taux de couverture théorique, sur la base des seuls points hauts SOMERO, serait de 76% en fréquence 450 MHz, contre 99% avec la fréquence 70 MHz utilisée pour SOMERO. **Ce taux de couverture pourrait être porté à 90% toujours en 450 MHz**, en densifiant les relais radio : passage de 33 à 72 relais en Lorraine, et 22 à 48 relais en Midi-Pyrénées Sud, **soit un peu plus qu'un doublement du nombre de points hauts (x2,2)**.

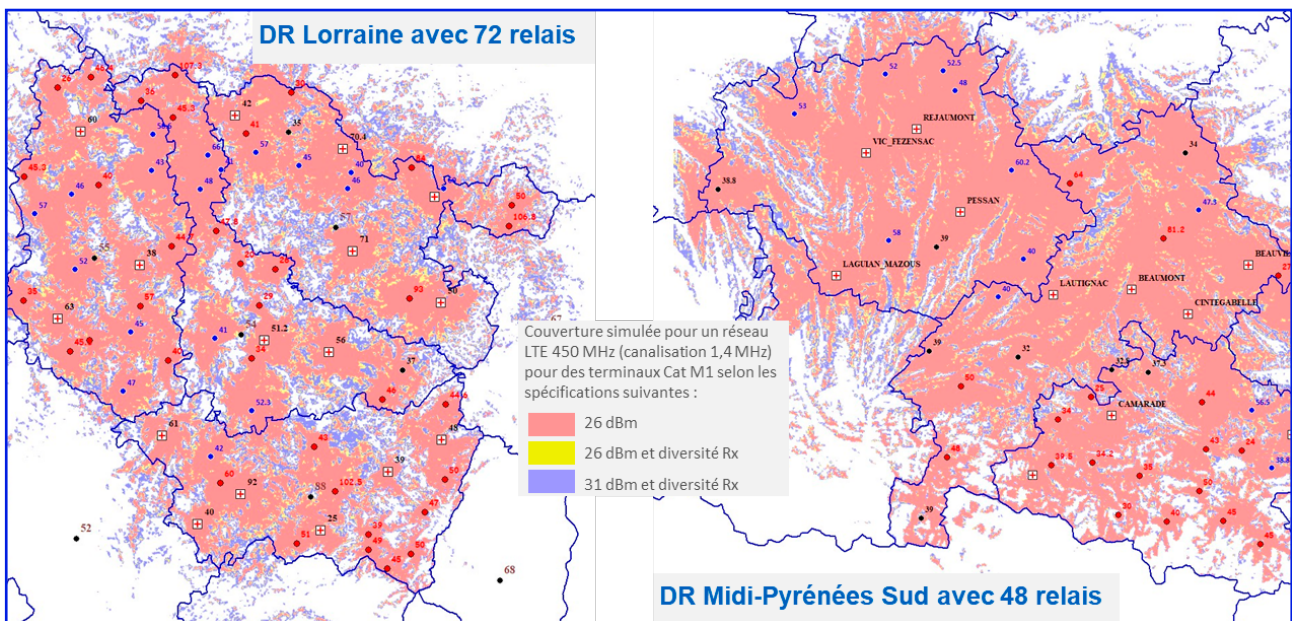


Figure 13 : Couverture simulée pour un réseau LTE 450 MHz sur les DR Lorraine et Midi-Pyrénées

**A l'échelle de la France métropolitaine, il faudrait environ 2500 sites radio pour un réseau résilient LTE 450 MHz afin d'atteindre un taux de couverture d'au moins 90% des équipements à connecter.** Cela représente en moyenne 46 sites radio pour 10.000 km<sup>2</sup>.



L'ordre de grandeur de cet indicateur semble cohérent avec les données collectées auprès d'autres réseaux 450 MHz disposant d'une couverture comparable.

Pays	Entité	Bande de fréquence	Nombre de sites radio	Nombre de sites radio pour 10 000 km <sup>2</sup>
Allemagne	450 connect	450 MHz	1600	45
Pays-Bas	Utility Connect	450 MHz	170	41
République Tchèque	Nordic Telecom	410 MHz	400	51

Figure 14 : Nombre et densité des sites radio pour les réseaux LTE 450 MHz des pays européens



## Défi #3 : Jouer la complémentarité réseau public / réseau privé

La mise en œuvre d'un réseau LTE résilient 450 MHz conduira à faire des compromis en faveur de la résilience, potentiellement au détriment d'autres performances (débit), notamment pour se distinguer des réseaux 4G/5G public.

On peut alors envisager une complémentarité de ces deux types de réseau, avec des objets disposant d'une connectivité à chacun d'eux. Cette hybridation de connectivité offrirait plusieurs avantages :

- + **Complémentarité de couverture géographique**
- + **Haute disponibilité**
- + **Complémentarité des performances** : un réseau privilégiant les besoins de résilience électrique, tandis qu'un réseau commercial 4G ou 5G apporterait davantage de débit. L'usage « mise à jour de firmware » peut nécessiter un débit soutenu sans pour autant nécessiter le niveau de résilience requis pour les usages « contrôle-commande ».

Les **stratégies d'hybridation** sont multiples :

- + « **Mode secours** » (« **fail-over** ») : un réseau est utilisé de manière nominale, l'autre est utilisé en cas d'indisponibilité du premier (incident, coupure électrique, absence de couverture...)
- + « **Sélection par usage** » : le réseau nominal dépend de la nature du flux (contrôle-commande, mise à jour, comptage...) et des exigences propres à ce flux. En cas d'indisponibilité d'un réseau, les flux l'utilisant, peuvent être basculés ou non sur l'autre réseau.

Deux solutions techniques permettent de mettre en œuvre cette complémentarité :

- + **Fonctionnement « Roaming »** : le terminal s'attache à son réseau par défaut, et lorsqu'il ne capte plus d'antennes sur ce réseau, il bascule sur le réseau alternatif. Cette fonctionnalité est native dans les réseaux cellulaires, et permet à un opérateur d'étendre la couverture de manière très simple (paramétrage du profil SIM) et d'offrir ainsi simplement une option de secours résilient à des clients/terminaux existants. En revanche, il convient de noter certains points d'attention :
  - 1/ Seule la stratégie « mode secours » est possible
  - 2/ Le « roaming » nécessite la mise en place d'une interconnexion et d'un contrat entre les deux réseaux cellulaires
  - 3/ Le cœur du réseau nominal reste nécessaire pour l'attachement à l'autre réseau
  - 4/ Le temps de bascule implique une coupure de l'ordre de la minute.
- + **Fonctionnement « dual SIM »** : le terminal dispose d'un SIM (ou eSIM) pour chacun des deux réseaux. Cela permet de s'attacher soit alternativement à chacun des réseaux (« mode secours ») soit simultanément aux deux réseaux (à condition d'avoir deux modules radio). Cette solution est plus polyvalente et permet la « sélection par usage », mais elle nécessite d'avoir des terminaux « dual SIM », voire « dual radio ».



Fonctionnement « Roaming »	Fonctionnement « Dual SIM »
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Compatible avec tous les terminaux (SIM unique)</li> <li>+ Fonction « roaming » très standardisée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Deux réseaux 100% indépendant</li> <li>+ Fonctionnement en parallèle des 2 réseaux</li> <li>+ Gestion de l'utilisation des 2 réseaux par l'objet</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limité au fonctionnement nominal / secours</li> <li>- Nécessite l'interconnexion des 2 réseaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessite des terminaux compatibles « Dual-SIM »</li> <li>- Coûts liés à deux abonnements au lieu d'un seul</li> </ul>



## Défi #4: Partager les investissements et l'infrastructure

Si des solutions sont identifiées pour réduire le nombre de sites radios et capitaliser sur des infrastructures existantes, la mise en place d'un tel réseau va néanmoins mobiliser des investissements de plusieurs dizaines de millions d'euros. Il convient donc de regarder les solutions permettant de **partager ces investissements** et **servir un maximum d'usages** avec des besoins similaires. Ce partage est également motivé par une ressource fréquentielle très limitée en bande 450 MHz, qui enjoint donc à un emploi efficient et équitable.



*« La faisabilité doit aussi prendre en considération les engagements de Responsabilité Sociétale et Environnementale (RSE). Cela signifie une recherche de mutualisation de l'infrastructure (éléments passifs et actifs) avec d'autres services pour une viabilité du modèle économique en termes de CAPEX et d'OPEX, ainsi qu'une collaboration entre opérateurs d'infrastructure dans la mise en œuvre d'infrastructures robustes et résilientes aux risques accrus des crises climatiques. »*

*Nicolas BIHANNIC - ORANGE*

Les acteurs susceptibles d'investir dans ce type de réseaux sont multiples :

- + **Les opérateurs de réseaux d'infrastructure** (électricité, eaux, gaz, chaleur, route, rail...) en tant que futurs utilisateurs de cette connectivité. Une participation à l'investissement leur permettrait de maîtriser davantage le service de connectivité qui reste souvent pour ces acteurs un point clé pour développer de nouveaux services et garantir la qualité et la résilience de leurs services.
- + **Les opérateurs télécoms sur le segment entreprise**, en vue de commercialiser un service de connectivité résilient aux acteurs qui requièrent un niveau de résilience similaire sans avoir la possibilité ou la volonté d'investir par eux même.
- + **Les « TowerCo »** (Tower Companies) qui investissent déjà dans les sites radios et les infrastructures nécessaires aux opérateurs télécoms pour déployer leurs antennes radio. Une TowerCo peut participer à un groupement pour rentabiliser ses actifs « points hauts ».

On peut envisager un investissement en groupement, avec un ou plusieurs acteurs par catégorie, afin de cumuler les actifs disponibles au départ et limiter ainsi les coûts et le temps de mise en œuvre d'un réseau résilient LTE 450 MHz.

Pour permettre à un tel groupement de fonctionner, il faut qu'il puisse offrir ce service de connectivité LTE résilient aux différentes entreprises partageant ce besoin, tout en garantissant à chacun résilience mais aussi fiabilité, performance et sécurité.



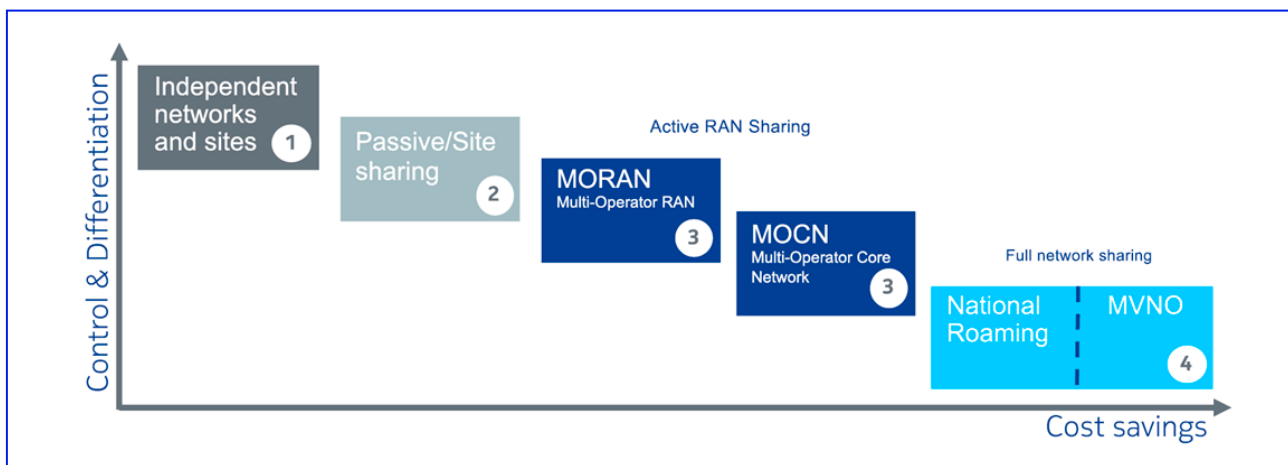


Figure 15 : Panorama des solutions de partage d'infrastructures pour les réseaux radio (source : Nokia)

Comme le montre le schéma, il existe de multiples options pour mettre en œuvre un tel partage d'infrastructure pour un réseau radio. Le choix de la solution est une question d'équilibre entre les coûts, le degré de contrôle de chaque entité, la complexité et les possibilités techniques. Habituellement, plus les économies d'échelle sont élevées, moins chaque partie prenante peut obtenir de contrôle et de différenciation.

Certaines de ces options ont déjà été évoquées ci-dessus :

- + **Le partage d'infrastructures passives / de sites radio (2)** : réutilisant des points hauts et des ateliers d'énergie du réseau SOMERO d'Enedis, réutilisation des points hauts proposés par des TowerCo ou des opérateurs télécoms.
- + **Le « Roaming »** permettant à l'opérateur du réseau résilient de gérer le trafic de clients d'un autre opérateur.

Nous approfondirons ici les avantages du « **RAN Sharing** », soit le partage d'infrastructures radio active RAN (Radio Access Network).

Le modèle « **MORAN** » (**Multi-Operator RAN**) s'applique quand chaque opérateur vient avec ses propres fréquences. Compte tenu des ressources fréquentielles très limitées en 450 MHz, un découpage de celles-ci en plusieurs attributaires sur un même territoire ne paraît pas pertinent. Par ailleurs, il n'existe pas vraiment d'équipements radio (antenne, RRU) adaptés pour émettre à la fois en bande 450 MHz et dans d'autres fréquences basses (ex : 700, 800 ou 900 MHz), chacune requérant ses propres spécificités (puissance, facteur de forme...). Une infrastructure radio active partagée, selon le modèle MORAN, consolidant les fréquences 450 MHz et d'autres fréquences ne semble pas envisageable.

Le modèle « **MOCN** » (**Multi-Operator Core Network**) permet de partager une infrastructure d'accès radio (RAN) entre plusieurs opérateurs, chacun disposant néanmoins de son propre cœur. Ce modèle permet ainsi de mutualiser les fréquences et l'infrastructure radio distribuée (représentant la majeure partie des investissements) tout en donnant à différents opérateurs la capacité à bénéficier de la couverture radio ainsi mise en œuvre. Avec un cœur dédié, chaque opérateur garde une grande autonomie et une liberté en termes de différenciation de service, contrairement à la solution « roaming ».

Plusieurs déclinaisons sont alors envisageables :

- + Mettre en place un **cœur mutualisé pour offrir des services sur étagères aux clients du réseau** (sans qu'ils aient besoin de mettre en oeuvre un cœur dédié)
- + Laisser la possibilité aux investisseurs du RAN de raccorder **des cœurs dédiés pour leur permettre de développer des services spécifiques propre à leur activité,**
- + Permettre **le raccordement de cœurs opérateurs existants**, dont certains clients pourraient alors bénéficier de la couverture résiliente apporté par le réseau radio 450 MHz.

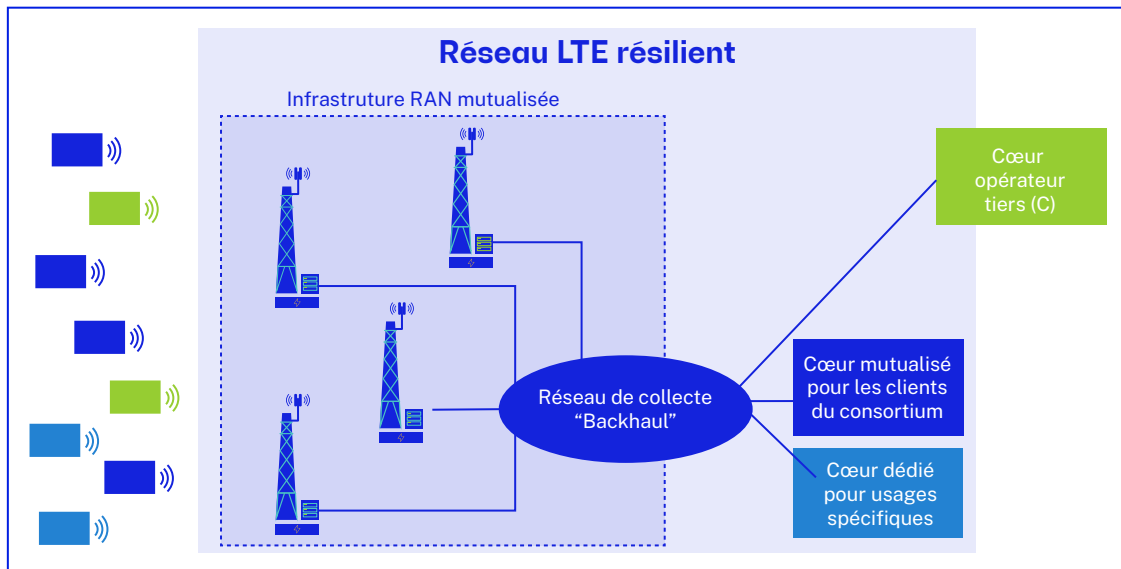


Figure 16 : Partage de l'infrastructure RAN résiliente par plusieurs cœurs opérateurs (modèle MOCN)

Cette capacité technique à interconnecter plusieurs cœurs, bien qu'à utiliser avec parcimonie, pourra permettre d'**ajuster le business modèle de l'opérateur ou du consortium responsable de ce réseau résilient 450 MHz** en fonction des parties prenantes. Ce business model pourra même évoluer dans le temps, en fonction des évolutions du tour de table, de la maturité des services et de la demande des bénéficiaires.

## Défi #5 : Assurer la résilience même en cas d'évènements électriques majeurs

Bien que la résilience électrique soit posée comme une exigence de départ pour le réseau LTE 450 MHz envisagé, décliner cette exigence de manière homogène dans les règles d'ingénierie de chacun des maillons constitutifs du réseau reste un enjeu capital. En effet, la faiblesse d'un seul maillon pourrait limiter la résilience de l'ensemble et remettre en cause les investissements consentis sur les autres maillons.

**Au niveau de l'objet connecté, l'autonomie électrique reste à la main du client utilisateur.** L'intégration de batterie et l'optimisation de la consommation électrique (« mise en veille ») est souvent déjà intégrée à la conception de ces équipements. C'est le cas notamment sur les organes de manœuvre télécommandés d'Enedis.

**Au niveau de chaque site radio, les investissements sont importants pour disposer d'un atelier d'énergie** (batterie, onduleur, redresseur) **capable d'offrir l'autonomie électrique requise pour l'ensemble des équipements actifs présents** (modules radio RRU et BBU, mais également l'équipement de rattachement au réseau de collecte « backhaul »). Un atelier capable de délivrer 1000W pendant 48h (soit 1000Ah en 48V) coûte environ 10.000 euros et son encombrement est équivalent à une armoire informatique. L'optimisation de la consommation des équipements radio est donc de mise. Les stratégies de « veille », particulièrement efficaces pour réduire la consommation électrique sur « un cycle d'utilisation normal », ne permettent pas de réduire le dimensionnement des batteries, car l'usage du réseau radio doit pouvoir être intensif lors des coupures électriques.

**Au niveau du réseau de collecte** (« backhaul »), plusieurs approches sont possibles pour assurer sa résilience : La mise en œuvre d'un **maillage des points hauts avec des faisceaux hertziens** point-à-point constitue la solution historique. Elle permet de s'appuyer sur les mêmes ateliers d'énergie présents sur les points hauts. En revanche, comme tout équipement radiofréquence, sa consommation électrique est importante et elle mobilise des fréquences radio. Les solutions peuvent également être sensibles aux aléas climatiques (dépointage des antennes paraboliques lors des tempêtes).

- + **Les réseaux de collecte privilégient désormais des réseaux fibrés**, pour mieux accompagner la montée en débit avec la 4G et 5G. Ils ont l'avantage également d'être moins énergivores. Néanmoins, ces réseaux mettent en œuvre plusieurs étages d'équipements actifs et n'ont pas été conçus pour apporter une résilience électrique de 48 heures. L'étage le plus critique est celui en périphérie, composé des Nœuds de Raccordement Optiques (NRO). Ces NRO bénéficient néanmoins de batteries en cas de panne électrique permettant une autonomie de 2 à 4 heures pour les services « grand public » (FTTH) et de 4 à 72 heures pour les services FTTO.
- + La fonction Integrated Access and Backhaul (IAB), au standard 3GPP, peut être également étudiée pour réaliser partiellement ce maillage, sans nécessiter l'ajout d'autres antennes, afin de réduire les coûts et le temps de raccordement de nouveaux sites radio.
- + **Les liaisons satellitaires** peuvent également être envisagées pour connecter les points hauts. Contrairement aux postes HTA/BT, les points hauts présentent moins de contraintes pour l'installation d'une antenne satellite parabolique ou plane (encombrement, horizon dégagé, protection contre le vandalisme).



Une combinaison de ces technologies doit permettre de mettre en œuvre un réseau de collecte résilient tout en limitant les investissements nécessaires pour renforcer leur autonomie électrique.

**Pour les cœurs de réseau**, la résilience s'appuie sur la redondance géographique des datacenters hébergeant ses plateformes : a minima deux centres sont utilisés et géographiquement bien répartis sur le territoire afin qu'un désastre climatique ou une panne électrique majeure n'impacte pas les deux. Ces datacenters bénéficient généralement d'un très haut niveau de sécurisation électrique : adductions HTA multiples, atelier d'énergie conséquent, groupe électrogène pouvant prendre le relais...

Si la résilience électrique nécessite une attention particulière en termes d'ingénierie pour chacun des maillons du réseau, les solutions techniques sont néanmoins présentes pour y arriver. **En Allemagne, 450connect revendique même une résilience de 72 heures**, compte tenu des précautions prises et détaillées dans le schéma ci-dessous.

## Implementation of requirements

### Resiliency up to 72 hours, Georedundancy, Priorization

LTE450 network in Germany will offer **high reliability and availability**:

- **72-hour power back-up at BTS locations** (realised with batteries)
- **Redundant microwave links** (ring architecture)
- **Own backbone ring** (close control and security requirements for access)
- **Georedundancy** of LTE core and MCPTT (two locations in Germany)
- **Prioritization of radio services** via technical mechanisms in the radio access and transmission network

→ **Nationwide LTE and LTE-M** coverage for critical voice and M2M services until 2025

● PoP  
☐ Example for Customer Data Center  
— Example for Customer Connection

450connect London, 18.04.2023 450alliance spring summit 9

Figure 17 : Précautions prises pour assurer une résilience de 72 heures sur le réseau LTE 450 MHz en Allemagne (source : 450connect)



## Conclusion

En réponse aux exigences croissantes de résilience du réseau électrique, et face à la fin de vie des solutions historiques de connectivité (PMR, cuivre), l'opportunité d'un réseau résilient LTE 450 MHz apparaît une réponse ambitieuse mais consistante.

Comme d'autres opérateurs de distribution électrique ayant déjà lancé la mise en œuvre de tels réseaux dans des pays voisins, Enedis dispose d'atouts pour initier un tel projet avec l'appui potentiel d'autres acteurs ayant des capacités complémentaires et/ou des intérêts communs.

Les défis à relever restent nombreux mais des solutions pragmatiques et viables sont déjà identifiées. La prochaine étape est la validation sur le terrain des solutions et hypothèses au travers d'un démonstrateur dont le périmètre tant géographique que fonctionnel ou technique pourra croître progressivement. Si des études de couvertures sur certaines zones géographiques propices à cette expérimentation sont déjà lancées par Enedis et EDF R&D, la disponibilité des fréquences constitue un jalon important pour poursuivre cette démarche.





## Remerciements

Ce livre blanc est le fruit d'un travail collaboratif réalisé en 2024 par différentes équipes coopérant depuis plusieurs années dans l'identification et l'expérimentation de solution télécoms au service des besoins de transformation d'Enedis. Nous remercions par conséquent :

Les équipes métiers **Enedis** (contrôle-commande, comptage, télécoms...) pour leurs expressions de besoin et les retours d'expérience terrain sur ce qui fonctionne et sur les difficultés rencontrées.

Les équipes **EDF R&D**, pour leur éclairage sur les technologies et solutions permettant de répondre aux enjeux actuels de la transition énergétique.

Les équipes **Nokia France**, pour leur soutien et leur pro-activité dans l'identification de solutions en réponse aux multiples défis posés par un réseau cellulaire résilient.

Les équipes **Orange France, Orange Innovation et Orange Business**, pour leurs contributions et commentaires ayant permis de mieux évaluer et challenger les solutions identifiées et leurs défis.

Les équipes **Wavestone**, pour l'animation du collectif et pour la synthèse des idées et contributions partagées.

# Glossaire

<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project (organisme de normalisation pour les technologies de télécommunications mobiles, dont LTE et 5G)
<b>ARCEP</b>	Autorité de Régulation des Communications Électroniques, des Postes et de la Distribution de la Presse (régulateur français des télécoms)
<b>BT</b>	Basse Tension (réseau électrique de basse tension, généralement jusqu'à 1 kV)
<b>CEPT</b>	Conférence Européenne des Postes et Télécommunications (organisation européenne pour la coopération en matière de télécommunications)
<b>CNES</b>	Centre National d'Études Spatiales (agence spatiale française)
<b>DMR</b>	Digital Mobile Radio (norme de radiocommunication numérique utilisée principalement dans les PMR)
<b>eSIM</b>	Embedded SIM (SIM intégrée directement dans un appareil, sans carte physique)
<b>FTTE</b>	Fiber to the Enterprise (fibre optique jusqu'à l'entreprise)
<b>FTTH</b>	Fiber to the Home (fibre optique jusqu'au domicile de l'abonné, pour le particulier)
<b>FTTO</b>	Fiber to the Office (fibre optique jusqu'au bureau, pour les entreprises)
<b>GSA</b>	Global mobile Suppliers Association (association mondiale des fournisseurs de technologies mobiles)
<b>HTA</b>	Haute Tension A (réseau électrique de haute tension pour la distribution d'électricité, typiquement entre 1 kV et 52 kV)
<b>IoT</b>	Internet of Things (Internet des Objets, réseau d'objets physiques connectés via Internet)
<b>LoRaWAN</b>	Long Range Wide Area Network (réseau de communication sans fil basse consommation pour l'IoT, basé sur le protocole LoRa)
<b>LTE</b>	Long-Term Evolution (standard pour les communications mobiles 4G)
<b>MOCN</b>	Multi-Operator Core Network (partage des réseaux d'accès radio entre plusieurs opérateurs tout en conservant des cœurs de réseau séparés)
<b>MORAN</b>	Multi-Operator Radio Access Network (partage de l'infrastructure radio par plusieurs opérateurs avec des cœurs de réseau distincts)
<b>MPLS</b>	Multiprotocol Label Switching (technique de transport de données qui optimise le routage et la gestion du trafic dans les réseaux)
<b>MvNO</b>	Mobile Virtual Network Operator (opérateur de réseau mobile virtuel, qui ne possède pas ses propres infrastructures, mais loue celles des MNO)
<b>PMR</b>	Professional Mobile Radio (réseaux radio mobiles professionnels utilisés par les services d'urgence et les entreprises)
<b>SCADA</b>	Supervisory Control and Data Acquisition (systèmes de contrôle et d'acquisition de données pour l'industrie)
<b>SIE</b>	Security Information and Event Management : Outils centralisant la collecte, l'analyse, et la corrélation des événements de sécurité pour détecter et répondre aux menaces en temps réel.
<b>SIM</b>	Subscriber Identity Module (carte qui identifie l'abonné sur le réseau mobile)
<b>TETRAPOL</b>	TErrestrial Trunked RAdio POLice (standard de radiocommunication numérique sécurisé pour les forces de sécurité et les services d'urgence)
<b>VoIP</b>	Voice over IP (transmission de la voix via Internet)
<b>VoLTE</b>	Voice over LTE (technologie permettant de passer des appels vocaux sur le réseau 4G)
<b>VSAT</b>	Very Small Aperture Terminal (système de communication par satellite utilisant des antennes de petite taille)

ENEDIS