

TACTIS

ETUDE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE CONNECTIVITÉ POUR LE TÉLÉRELEVÉ DES COMPTEURS D'EAU EN FRANCE

Octobre 2023

TACTIS



43 rue des Meuniers
94300 Vincennes - France



+33.1.49.57.05.05



contact@tactis.fr

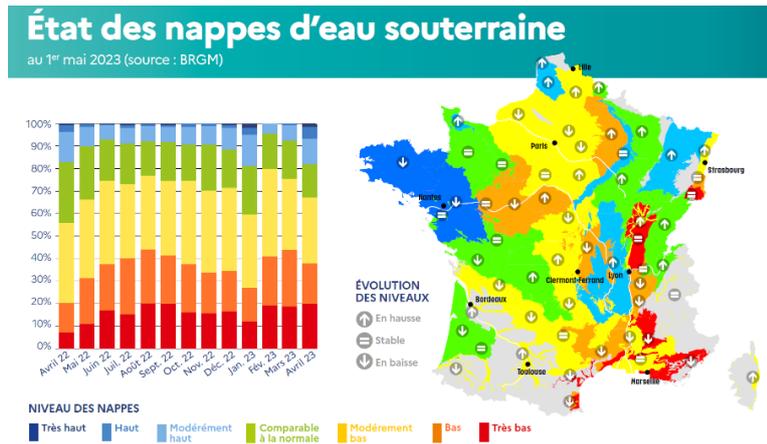
SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	3
1.1	Les enjeux de la distribution d'eau en France.....	3
1.2	Le télérelevé pour les réseaux de distribution d'eau	4
2	ENJEUX DU TELERELEVE ET SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES.....	8
2.1	Enjeux de performance du télérelevé des compteurs d'eau	8
2.2	Les technologies disponibles en France pour le télérelevé	13
3	ADOPTION DES TECHNOLOGIES POUR LE TELERELEVE.....	17
3.1	Diversité d'opérateurs	17
3.2	Couverture pour le télérelevé	17
3.3	Compteurs communicants déployés	18
3.4	Coûts liés à la technologie	18
3.5	Conclusion	20
4	ANALYSE COMPARATIVE DE LA PERFORMANCE.....	21
4.1	Couverture et pénétration dans les bâtiments	22
4.2	Gestion énergétique	24
4.3	Débit et capacité	25
5	REVERSIBILITE, FIN DE CONTRAT ET REPRISE DE L'EXISTANT	27
6	EXEMPLES DE DEPLOIEMENTS DE COLLECTIVITES FRANÇAISES.....	29
6.1	LoRaWAN™ : SPL L'eau des collines.....	29
6.2	Wize : Télérelève de la Régie d'eau de Mulhouse.....	30
6.3	LoRaWAN™ : Oélie, l'eau de Saint-Etienne Métropole	31
7	BIBLIOGRAPHIE ET REFERENCES	32

1 INTRODUCTION

1.1 Les enjeux de la distribution d'eau en France

La disponibilité d'eau potable en quantité et qualité suffisantes est l'objet d'attentions croissantes ces dernières années en France. De nombreuses zones géographiques sont désormais soumises à des arrêtés de réduction de consommation d'eau, parfois dès le printemps ⁱ.



Comme illustré sur la figure 1, ce sont désormais au moins 50% des nappes d'eau souterraine qui ont un niveau inférieur à la normale toute l'année, et 80% d'entre elles qui atteignent ce niveau au cours de l'année.

Bien que la situation soit relativement hétérogène, aucune région française ne peut aujourd'hui se considérer à l'abri d'une raréfaction de la ressource en eau.

Figure 1 : situation des nappes en France au 1^{er} mai 2023 ⁱⁱ

Ce contexte difficile d'une ressource plus rare, et de besoins en croissance régulière qui tend à se complexifier chaque année, place les autorités locales et notamment les collectivités en première ligne pour faire émerger de nouvelles pratiques de gestion de l'eau.

La médiatisation croissante de la thématique par le prisme du niveau des nappes souterraines ou le débit des rivièresⁱⁱⁱ, des arrêtés de restrictions^{iv} ou encore des pertes du réseau, accentue la responsabilité publique et la visibilité des actions menées par les décideurs et des opérateurs du réseau.

Figure 2 : Suivi hebdomadaire des nappes en déficit sur le site de France info

L'efficacité globale du réseau de distribution d'eau potable devient un sujet de plus en plus scruté, avec des impacts concrets pour les territoires. L'information et la pédagogie auprès des usagers est également indispensable pour permettre la préservation de la ressource à travers une consommation efficiente et raisonnée.

Connaître la consommation des usagers et avoir la capacité de l'analyser finement, avec des données *a minima* quotidiennes et idéalement horaires, sera l'un des outils clés pour accompagner la démarche de sobriété hydrique et d'efficacité, désormais au cœur des préoccupations tout au long de l'année en France.

1.2 Le télérelevé pour les réseaux de distribution d'eau

1.2.1 Une dynamique de forte croissance

Les infrastructures de réseaux d'eau potable sont directement impactées par les révolutions des télécommunications et de l'internet des objets. Le télérelevé des compteurs d'eau s'inscrit dans cette dynamique, avec une forte croissance dans le monde et en particulier en France : le nombre de compteurs connectés pour les réseaux de distribution d'eau potable a été multiplié par trois en dix ans dans le pays.

La France est l'un des pays d'Europe où le déploiement des solutions de télérelevé est le plus avancé ; sur un marché européen des compteurs connectés qui atteignait 15,6 millions de capteurs en 2021 selon Berg Insight^v, la France représente un tiers du total avec 5 millions de compteurs communicants installés.

Ce nombre reflète un développement continu et soutenu, avec un taux de croissance annuel estimé par ce même rapport à 15% jusqu'en 2027 pour le périmètre Europe ; pour la France la perspective est un doublement de la quantité de compteurs connectés à l'horizon 2030, soit au moins 10 millions d'équipements à cette échéance.

Chiffres clés France

25 millions
de compteurs d'eau

5 millions
connectés à une infrastructure de télérelevé soit 20% de pénétration

15% de croissance annuelle des
compteurs télérelevés

10 millions (x2)
de compteurs connectés en 2030

La croissance du marché des compteurs communicants est notamment portée par de grands projets, bien que de nombreuses réalisations de moindre ampleur à travers le territoire confirment l'attractivité de cette solution pour répondre aux problématiques de gestion de l'eau rencontrées par tous les types de collectivités locales.

Le tableau ci-après présente quelques exemples de grands projets de déploiement en France.

Projet	Opérateur	Nombre de compteurs communicants
SEDIF (Syndicat des Eaux d'Ile de France)	Veolia	596 000 ^{vi}
Lyon	Veolia	354 000 ^{vii}
Eau de Paris	Suez	90 000 ^{viii}
Le Mans métropole	Suez	30 000, 120 000 à terme ^{ix}
Saint Etienne ¹	Saur	110 000 ^x

Tableau 1 : Exemples de grands projets de déploiement en France

¹ Projet en cours de déploiement

1.2.2 Les bénéfices obtenus avec le télérelevé des compteurs d'eau

La mise en œuvre d'une solution de télérelevé - qui nécessite une mise à niveau des compteurs et doit s'appuyer sur une infrastructure de communication suffisamment robuste et performante - est l'un des moyens à déployer pour répondre aux enjeux d'une gestion efficiente des réseaux décrits dans le chapitre 1.1.

- **Relevé à la journée ou à l'heure**

Dès que le déploiement de la solution de télérelevé des compteurs d'eau a débuté, les usagers concernés peuvent rapidement bénéficier d'un suivi de leur consommation à la journée ou à l'heure suivant la granularité de mesure choisie.

D'une part, cela répond à une attente qui se généralise, notamment avec les précédents établis par Linky^{xi} et Gazpar^{xii}, qui ont fait évoluer les usages des consommateurs, plus attentifs à la maîtrise de leur consommation énergétique.

Ce phénomène s'est amplifié avec la crise énergétique et la mise en place d'indicateurs tels qu'EcoWatt^{xiii}. Une telle politique publique et médiatique sur les sujets électricité/gaz pourrait vraisemblablement s'étendre au domaine de l'eau dans les prochaines années, avec une attente forte - tant des consommateurs que des pouvoirs publics - sur la mise en place d'un indicateur de disponibilité de la ressource par rapport aux consommations mesurées par territoire. La gestion décentralisée des infrastructures d'eau et la disparité géographique des problématiques tend à limiter la pertinence d'un indicateur national.

D'autre part cette relève régulière permet aux collectivités et aux opérateurs du réseau de distribution de mieux connaître les usages et la consommation, avec une fiabilité et une régularité de mesure permettant un suivi analytique à granularité fine dans la durée, ce qui permet une meilleure anticipation des besoins ou encore la vérification de l'adéquation du réseau de distribution avec les usages réels.

Le relevé régulier permet par ailleurs d'effectuer une facturation au réel, quelle que soit la périodicité choisie, sans surprise pour les usagers qui ont la possibilité de suivre leurs consommations régulièrement. La qualité de service perçue est améliorée et la relation client améliorée, ce qui est mutuellement bénéfique aux consommateurs et aux collectivités.

Enfin, la relève régulière des consommations est une donnée d'entrée permettant d'actionner plusieurs autres bénéfices obtenus lors du déploiement d'une solution de télérelevé des compteurs d'eau.

- **Rendement quotidien du réseau**

Le rendement du réseau est un indicateur phare de l'efficacité des infrastructures de distribution d'eau potable. Le tableau ci-après présente des exemples de rendements pour plusieurs grandes agglomérations françaises (issu du *Rapport de conclusion de l'état des lieux du service de l'eau, SEDIF 2021*^{xiv}).

Collectivité	Rendement réseau distribution
Bordeaux métropole	84 %
Chartres métropole	86 %
Rennes	94 %
Montpellier métropole	82,6 %
Nantes métropole	84,5 %
SEDIF (Syndicat des Eaux d'Ile de France)	90 %

Tableau 2 Exemples de rendements de réseaux sur des agglomérations en France

Ce rendement est calculé sur la base de la quantité d'eau potable injectée dans le réseau, comparée à la quantité effectivement consommée par les usagers sur la base des index de compteur (ou "consommée" à travers d'autres usages supervisés comme les poteaux d'incendie). Il est la mesure effective des pertes, soit la quantité d'eau potable gaspillée.

Comme évoqué au chapitre 1, le rendement du réseau est un indicateur de plus en plus médiatisé. Son suivi ne peut par conséquent plus être annuel et basé sur des estimations et extrapolations. Le déploiement d'une solution de télérelevé des compteurs d'eau permet la mesure du rendement quotidien du réseau de distribution, en tant qu'indicateur de performance pour l'opérateur et la collectivité.

L'agrégation des consommations de l'ensemble des compteurs télérelevés, mise en rapport avec l'injection d'eau potable dans le réseau, fournit automatiquement chaque jour un indicateur indispensable pour les collectivités qui souhaitent mesurer l'efficacité et réduire les pertes sur leur infrastructure.

Cette approche s'applique également à des portions de réseau, sous réserve que la quantité entrante soit mesurée au niveau des vannes et éléments de répartition. Le déploiement d'une infrastructure de télérelevé doit donc s'inscrire dans une démarche globale autour de la gestion du réseau et de son efficacité, en ajoutant le cas échéant les dispositifs de mesure complémentaires dans les équipements de gestion du réseau.

- **Détection de fuite accélérée**

La collecte de données quotidiennes voire horaires permet d'identifier beaucoup plus rapidement les fuites, qu'elles soient sur le réseau ou après compteur. La détection de fuite accélérée apporte un service complémentaire aux usagers du réseau ainsi qu'une meilleure réactivité aux gestionnaires de ce dernier.

Dans le cas de la détection de fuite avant compteur, la comparaison fréquente des consommations des compteurs communicants avec les quantités injectées sur des sous-ensembles du réseau permet d'identifier des pertes et donc de potentielles fuites.

En ce qui concerne la détection de fuite après compteur, c'est l'analyse des schémas d'usage et une alerte sur seuils de consommation dynamiques qui permet d'informer à la fois le gestionnaire et les usagers concernés d'une potentielle fuite. Ce bénéfice est mutuel pour les deux parties, notamment dans le cadre de l'application du décret n°2012-1078 du 24 septembre 2012^{xv} (dit « Loi Warsmann »), en limitant les procédures et recours associés au plafonnement de la facturation de la surconsommation.

- **Identification d'usages non autorisés**

Dans le cadre d'une gestion contrainte de la ressource en eau, les cas de restrictions des usages se multiplient. Lorsqu'une solution de télérelevé est déployée sur un territoire, cette dernière peut être (dans les cas les plus critiques) un outil de surveillance de la bonne application des restrictions permettant une réponse graduée en direction des contrevenants (sensibilisation renforcée en premier lieu, puis sanction selon la politique locale en place).

Une mesure horaire des consommations et l'analyse des données collectées permet, grâce aux nouvelles technologies de traitement de l'information disponibles, d'identifier de potentiels usages non autorisés.

Par exemple, la consommation d'un particulier pourra être mise en regard d'un arrêté de restriction d'arrosage ou de remplissage de piscine partiel ou total ; ces formes de consommations étant relativement simples à identifier sur des profils de consommation.

Une restriction d'interdiction d'ouverture de certains types d'établissements, comme un lavage de véhicules, pourra également être plus subtile, plus efficace, en mettant en regard les consommations dudit établissement.

- **Gestion du contrat**

Pour le gestionnaire du réseau et donc la collectivité délégataire ou opératrice en régie, une infrastructure de télérelevé performante permet d'améliorer le suivi des contrats des consommateurs.

Tout d'abord à travers la détection de consommations sur des compteurs non rattachés à un contrat, en cas d'oubli d'ouverture ou de résiliation. L'opérateur du réseau a désormais la possibilité de garantir le paiement pour chaque m3 délivré.

D'autre part à travers le diagnostic de mauvais dimensionnement des compteurs et/ou abonnements, ce qui permet une régularisation rapide, une facturation au juste prix et limite les litiges *a posteriori*.

Enfin, cela permet d'identifier les compteurs qui peuvent parfois se bloquer, la mesure physique restant basée sur un principe mécanique. Les consommations non mesurées sont donc réduites, minimisant l'impact financier associé.

2 ENJEUX DU TELERELEVE ET SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

2.1 Enjeux de performance du télérelevé des compteurs d'eau

L'obtention des bénéfices définis au chapitre précédent est conditionnée à la performance de la solution de télérelevé déployée et à sa capacité à délivrer les informations nécessaires aux calculs des indicateurs ou aux détections d'anomalies.

Les trois principaux indicateurs utilisés pour vérifier la capacité du télérelevé à atteindre les objectifs de performance et donc les bénéfices apportés sont :

1. Le taux de raccordement : nombre de compteurs effectivement connectés au réseau de collecte
2. Fréquence de relevé et taux de fraîcheur des informations : date de la dernière donnée collectée
3. La complétude des données : nombre de points de mesure collectés sur une période définie

En complément, la compatibilité du réseau déployé avec les équipements de mesure et de gestion du réseau (autres que compteurs) est un élément à prendre en compte dans le choix de la solution de télérelevé, bien que cela n'affecte pas forcément directement les performances.

L'importance des indicateurs de performance pour les bénéfices attendus d'une solution de télérelevé sont synthétisés dans le tableau suivant, le détail est disponible dans les paragraphes dédiés :

		Principaux indicateurs de QoS du télérelevé		
		Taux de compteurs télérelevés	Fréquence de relevé	Complétude des données
Bénéfices attendus du télérelevé	Relève à la journée ou à l'heure	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲
	Rendement quotidien du réseau	▲▲	▲	▲▲▲
	Détection de fuite en > de 24h	▲▲▲	▲▲▲	▲
	<i>Avant compteur</i>	▲▲	▲▲	▲
	<i>Après compteur</i>	▲▲▲	▲▲▲	▲
	Identification d'usages non autorisés	▲▲	▲▲▲	▲▲
	Gestion du contrat	▲▲	▲	▲

Tableau 3 : Importance des différents critères de performance pour l'obtention des bénéfices attendus

2.1.1 Taux de raccordement

Le taux de raccordement mesure le nombre de compteurs effectivement connectés au réseau de télérelevé sur une période donnée, et le compare au nombre total de compteurs déployés. Par exemple, sur un réseau de 1 000 compteurs, si 990 ont été connectés et ont transmis leurs informations pendant les 48 dernières heures, alors le taux de raccordement est de 99%.

Plus le taux de raccordement est élevé, meilleure sera la couverture de données pour le réseau de distribution. Cet indicateur est généralement mesuré sur plusieurs périodes, pour tenir compte des conditions d'exploitation et des contraintes techniques inhérentes aux réseaux de communication. Le tableau suivant présente les objectifs de performance nécessaires pour garantir les bénéfices attendus :

Indicateur de taux de raccordement	Performance généralement requise
Taux de raccordement sur 48h	> 94%
Taux de raccordement sur 7 jours	> 96%
Taux de raccordement sur 28 jours	> 98%

Tableau 4 : Indicateurs de performance typiques pour le taux de raccordement, moyenne constatée sur les cahiers des charges d'appels d'offres publics

Le tableau de lien entre l'indicateur de performance et les taux de raccordement par période de contrôle apporte un niveau d'information supplémentaire :

		Taux de raccordement (général)	Taux de raccordement 48h	Taux de raccordement 7 jours	Taux de raccordement 28 jours
Bénéfices attendus du télérelevé	Relève à la journée ou à l'heure	★★★★	★★★★	★	★
	Rendement quotidien du réseau	★★	★★	★★	★★
	Détection de fuite en > de 24h	★★★★	★★★★	★★	★
	- Avant compteur	★★	★★	★★	★★
	- Après compteur	★★★★	★★★★	★★	★★★★
	Identification d'usages non autorisés	★★	★	★★★★	★★
Gestion du contrat	★★	★	★★	★★★★	

Tableau 5 : Importance des différents taux de raccordement pour l'obtention des bénéfices attendus

- **Taux de raccordement pour la relève à la journée ou à l'heure**

Cet indicateur de performance est essentiel pour la relève à la journée ou à l'heure, car tout compteur qui ne communique plus pendant 48h ou plus dégrade inévitablement le bénéfice apporté, notamment pour les usagers : sans connexion du compteur au réseau, pas de relevé de consommation à leur présenter.

La facturation étant généralement établie sur base mensuelle (ou plus longue), le gestionnaire du réseau évaluera avec attention le taux de raccordement sur 28 jours (prenant en compte le cas le plus contraignant du mois de février).

- **Taux de raccordement pour la détection de fuites**

Le taux de raccordement est également très important pour permettre une détection de fuites en moins de 24h.

- **Fuites après compteur**

Pour les fuites après compteur, en l'absence de communication du compteur pendant cette période et donc sans transmission des données de consommation, la détection est impossible dans le délai souhaité. En revanche, il

est important pour la solution déployée d'être en mesure de permettre une détection a posteriori : si un compteur retrouve une connexion au réseau de communication et transmet un historique des données collectées pendant qu'il était hors ligne, le calcul permettant d'identifier une potentielle fuite après compteur doit s'exécuter et reporter l'anomalie. Cela s'avère d'autant plus important dans le cadre de la loi Warsmann.

- **Fuites avant compteur**

S'agissant des fuites avant compteur, les données manquantes peuvent être estimées à partir des profils de consommation usuels. Toutefois un doute pourra subsister quant à l'identification d'une potentielle fuite sur le réseau de distribution, ce qui justifie que l'analyse des fuites sur le réseau fasse appel à d'autres informations permettant de corroborer les suspicions : mesure de pression en différents points du réseau, étude des variations brutales... Par ailleurs, un débit anormalement élevé qui serait incompatible avec la consommation maximale de l'ensemble des compteurs non connectés justifiera l'envoi d'une alerte de fuite au gestionnaire du réseau avec un très haut degré de fiabilité. En revanche, une détection de fuite incertaine devra être traitée avec précautions pour limiter l'émergence de « faux positifs » préjudiciables à l'exploitation du réseau.

- **Taux de raccordement pour le rendement quotidien du réseau**

L'évaluation du rendement quotidien du réseau est effectuée en agrégeant les données de mesure de l'ensemble ou d'une sous-partie des compteurs de consommation finale, pour les comparer avec les autres dispositifs de mesure de débit présents pour la gestion de l'exploitation. Le taux de raccordement est donc un critère de performance qui affectera le bénéfice attendu. Cependant comme évoqué dans le chapitre précédent sur la détection de fuites sur le réseau, les informations manquantes peuvent généralement être extrapolées dans une certaine mesure, et le rendement du réseau peut être consolidé en utilisant d'autres données de mesure des équipements de gestion de la distribution.

- **Taux de raccordement pour l'identification d'usages non autorisés**

L'identification d'usages non autorisés n'est pas fortement contrainte temporellement : l'analyse des consommations peut se faire *a posteriori* et l'alerte associée traitée quelques jours après leur détection. C'est pourquoi le taux de raccordement à 7 jours sera l'indicateur à privilégier pour ce bénéfice attendu, considérant qu'une identification trop tardive serait néanmoins préjudiciable pour l'efficacité de l'information/sanction.

- **Taux de raccordement pour la gestion du contrat**

Les bénéfices attendus pour la gestion du contrat peuvent accepter un retard dans la fourniture des données d'un nombre limité de compteurs. Bien que cela puisse être préjudiciable à la facturation dans le cadre d'un compteur bloqué, la probabilité d'un compteur qui cumulerait les défauts bloqués et non connecté reste toutefois relativement faible. La considération générale est que la temporalité de gestion des contrats est mensuelle, c'est donc le taux de raccordement à 28 jours qui sera à privilégier pour ce bénéfice attendu.

2.1.2 Fréquence de relevé et taux de fraîcheur

La fréquence de relevé choisie pour un réseau de distribution d'eau dépend des bénéfices attendus pour le projet. Certaines situations nécessitent plusieurs relevés par jour, quand un index quotidien suffit à d'autres cas d'usage. C'est donc une configuration qui doit être déterminée en amont, dès la phase de consultation, afin de permettre le choix de la meilleure solution technique pour maximiser l'efficacité opérationnelle.

Il est important de noter que la communication sur le réseau est l'élément le plus dimensionnant pour la durée de vie de la batterie : plus la fréquence de relevé est importante, moins la durée de vie de la batterie sera longue.

Le taux de fraîcheur dépend initialement de la fréquence de relevé choisie, et peut être ensuite impacté négativement par la disponibilité et la fiabilité du réseau de communication. Par exemple, sur une fréquence quotidienne, pour un compteur qui ne communique pas de données pendant 48h, les données disponibles ont une fraîcheur de 3 jours. En revanche, un compteur en fréquence horaire qui ne parvient à transmettre le relevé qu'une fois sur deux aura une fraîcheur dégradée de 1,5 heure en moyenne, au lieu d'une heure idéalement.

- **Fréquence et fraîcheur pour le relevé à la journée ou à l'heure**

Pour permettre un relevé à la journée ou à l'heure, il est évidemment important que la fréquence de remontée des données soit en accord avec la fréquence cible de relevé.

Pour ce qui est du taux de fraîcheur, son importance dépendra essentiellement de l'usage qui est fait du relevé, et même de l'acteur concerné : pour un gestionnaire de réseau de distribution, il est acceptable que les données de consommation ne soient disponibles qu'au bout de 48h, il est en revanche moins agréable pour un usager de n'avoir aucune information sur la semaine passée.

- **Fréquence et fraîcheur pour la détection de fuites**

La fréquence doit impérativement être au plus quotidienne pour permettre une détection de fuites en moins de 24h. C'est l'un des critères de dimensionnement nécessaire au choix de la fréquence pour un projet de déploiement de télérelevé.

Le taux de fraîcheur impactera directement la capacité de détection des fuites en 24 heures. Le choix d'une fréquence plus élevée que la durée maximale autorisée peut permettre de réduire l'impact des problèmes de communication temporaires pouvant être rencontrés sur le réseau.

- **Fuites après compteur**

Pour les fuites après compteur, si la fraîcheur dépasse la durée maximale de détection, cette dernière est impossible dans le délai souhaité.

- **Fuites avant compteur**

S'agissant des fuites avant compteur, le taux de fraîcheur présente un moindre impact sur le bénéfice attendu, tant qu'il reste globalement élevé à l'échelle du réseau. Des données anciennes pour un faible pourcentage de compteurs n'altéreront pas la capacité de détection, bien qu'un doute puisse parfois subsister. Les données des équipements de gestion du réseau viennent là aussi renforcer les algorithmes mis en œuvre.

- **Fréquence et fraîcheur pour le rendement quotidien du réseau**

La fréquence des relevés doit être en cohérence avec le bénéfice attendu sur la mesure du rendement du réseau : pour surveiller le rendement au quotidien, la fréquence doit être au moins quotidienne. En revanche, la fraîcheur est de moindre importance dans ce cadre, l'analyse du rendement n'étant pas calculée en temps réel. Il est tout à fait acceptable d'analyser le rendement en différé une fois que les informations sont transmises et disponibles.

- **Fréquence et fraîcheur pour l'identification d'usages non autorisés**

Le choix de la fréquence de collecte est très important pour la détection d'usages non autorisés. Si la fréquence est trop faible, il sera difficile voire impossible d'identifier des schémas de consommation et d'y détecter des comportements anormaux ou potentiellement non autorisés, en particulier pour les restrictions qui s'appliquent sur des plages horaires, ce qui est très généralement le cas pour les usages résidentiels.

La fraîcheur est de moindre importance, l'analyse pouvant être effectuée en décalé. Toutefois le taux de fraîcheur doit rester acceptable pour éviter un trop grand décalage entre le comportement anormal et l'information/sanction.

- **Fréquence et fraîcheur pour la gestion du contrat**

L'horizon temporel des actions de gestion de contrat étant principalement mensuel, la fréquence et la fraîcheur ont peu d'importance dans l'atteinte des objectifs de ce bénéfice attendu. Toutefois, la détection de compteur bloqué sera retardée en cas de faible taux de fraîcheur.

2.1.3 Complétude des données

La complétude des données est évaluée en nombre de jours de relevé disponibles sur une période, généralement l'année. Ce critère de performance est très important pour plusieurs des bénéfices attendus, car l'exploitation des données collectées nécessite un bon niveau de complétude pour garantir la fiabilité des algorithmes utilisés.

Une caractéristique importante pour les solutions de télérelevé en lien avec ce critère de performance est leur capacité de rétention en local dans le compteur : dans le cas où les données ne sont pas transmises par le compteur, ce paramètre détermine au bout de quel délai elles seront perdues car non conservées. Cette rétention est généralement exprimée en nombre de points de données, ce qui la rend indépendante de la fréquence choisie pour un projet.

Lorsqu'un compteur qui n'a pas transmis de données de relevé depuis plusieurs jours se reconnecte au réseau, il peut alors transmettre l'ensemble des données disponibles sur la période hors ligne, ce qui permet de reconstruire l'historique de consommation *a posteriori*.

Le niveau généralement admis pour un bon niveau de complétude est d'au moins 320 jours sur une année glissante, pouvant être réduit à 300 jours lorsque les bénéfices attendus ne dépendent pas principalement de ce critère de performance. Ce critère s'évalue conjointement avec la durée d'indisponibilité des données, qui est couvert par le taux de raccordement évoqué précédemment.

- **Complétude pour le relevé à la journée ou à l'heure**

La complétude est importante pour le relevé à la journée (et encore plus à l'heure), car toute donnée non collectée sera directement visible pour l'utilisateur final. Des algorithmes de reconstruction de points isolés manquants peuvent le cas échéant combler de petites périodes sans informations disponibles, toutefois ils atteignent rapidement leurs limites dès que les segments vides s'allongent.

- **Complétude pour la détection de fuites**

La complétude est un critère peu significatif pour la détection des fuites. Il s'agit de phénomènes durables, il est rare qu'une fuite disparaisse par résolution spontanée, et les données manquantes à l'échelle des compteurs individuels n'ont pas d'impact sur la détection, sous réserve que les périodes vides n'excèdent pas quelques jours (voir taux de raccordement).

- **Complétude pour le rendement quotidien du réseau**

L'évaluation quotidienne du rendement du réseau nécessite un calcul fiable de la consommation finale. Ce calcul peut être effectué en décalé, toutefois la quantité de données disponibles pour chaque jour d'exploitation impacte directement sa fiabilité. On cherchera donc à obtenir une complétude maximale, au-delà de 320 jours, pour ce critère dans ce cas d'usage.

- **Complétude pour l'identification d'usages non autorisés**

L'absence de données sur une période peuvent impacter négativement la capacité d'identification d'usages non autorisés, particulièrement dans le cas où des restrictions s'appliquent sur une plage horaire et que la fréquence de relevé est élevée. On peut toutefois considérer que certains usages abusifs sont répétitifs et peuvent potentiellement être détectés sur d'autres plages de relevés.

Pour les restrictions sectorielles comme les stations de lavage, la complétude n'a pas d'impact tant que des données de relevé sont disponibles pendant la période de restriction.

- **Complétude pour la gestion du contrat**

La complétude des données est relativement peu importante dans le cadre de la gestion du contrat. En effet, les compteurs bloqués se débloquent rarement seuls et les consommations nulles prolongées restent visibles même en cas d'absence de données sur des périodes isolées.

Par ailleurs, l'analyse de la consommation au regard de la capacité du compteur est également effectuée sur une plage temporelle large qui tolère les absences d'information.

Enfin, pour les compteurs non rattachés à un contrat, c'est l'index courant qui est pris en référence pour la régularisation donc tout manque d'information précédente est sans impact sur le bénéfice attendu.

2.2 Les technologies disponibles en France pour le télérelevé

Les technologies radio dites LPWAN (*Low Power Wide Area Network*, réseaux longue distance à faible consommation) sont dominantes dans le télérelevé des compteurs d'eau en France, qui s'appuie sur une offre large et diversifiée, au sein d'un écosystème dont la croissance mondiale annuelle estimée du nombre de capteurs est de 50%^{xvi}.

Les réseaux LPWAN sont caractérisés par :

- Une communication radio **longue portée**, de l'ordre de 10 à 40 km en rural et 0,5 à 5 km en urbain. Cette portée est principalement permise par l'utilisation de bandes de fréquence en dessous du GHz.
- Une **sobriété énergétique**, permettant un fonctionnement sur batterie pendant plusieurs années (parfois plus de 10 ans). Cette sobriété est notamment permise par la mise en veille des capteurs en dehors des périodes de transmission, le réseau n'impose pas de connexion permanente.
- L'utilisation de **bandes de fréquence ouvertes**, pour lesquelles il n'est pas nécessaire d'obtenir de licence préalable. La technologie cellulaire Narrowband-IoT (NB-IoT) évoquée par la suite est néanmoins un contre-exemple notable.

2.2.1 LoRaWAN

Le LoRaWAN™, acronyme de Long Range Wide Area Network, est une technologie de communication radio basse consommation spécialement conçue pour l'internet des objets. Initialement développée par la société française

Cycleo, acquise par Semtech en 2012, son développement technique et commercial est désormais porté par l'intermédiaire de l'organisation LoRa Alliance, qui regroupe 365 membres^{xvii} à travers le monde (dont Amazon, Microsoft, Cisco...).

Le standard LoRa définit les bandes de fréquences pouvant être utilisées selon la géographie considérée, en accord avec les réglementations locales. Pour l'Europe, l'essentiel des déploiements se fait sur la bande radio 868MHz, libre de droit sur tout le territoire. C'est un gage de pérennité utile pour le cas d'usage du télérelevé, qui doit permettre une exploitation sur le long terme.

Le choix de cette bande de fréquences rend l'utilisation du réseau LoRaWAN[™] en Europe totalement ouverte, aucune licence ou accord préalable n'est nécessaire pour déployer et opérer un réseau privé. De nombreuses collectivités ou territoires se tournent également vers des déploiements en propre, afin de maîtriser et mutualiser leur infrastructure de communication. Un exemple marquant en France est le Syndicat Départemental d'Énergie et d'Équipement du Finistère (SDEF) qui déploie un réseau LoRaWAN[™] dans le cadre de son initiative Finistère Smart Connect, dont un des cas d'usage ciblés est le télérelevé quotidien des compteurs d'eau^{xviii}. Cette approche présente le principal avantage de pouvoir dimensionner le réseau au plus juste, et de l'adapter à l'évolution des usages et des équipements qui y sont connectés. Il permet par exemple facilement d'ajouter un relais de communication lorsque des compteurs de télérelevé ont une couverture trop faible, pour un prix modeste.

Des solutions nationales sont également disponibles auprès des grands opérateurs sur un réseau déjà déployé ; en France le réseau Orange couvre 95% de la population française^{xix} pour des usages extérieurs. Ce point est traité en détails dans le chapitre 3 dans le paragraphe Couverture.

Le LoRaWAN[™] est une solution totalement compatible et même indiquée pour le télérelevé des compteurs d'eau en France, en témoigne son référencement dans la norme EN-13757.

En effet, outre sa portée significative et la faible consommation d'énergie, communes aux technologies LPWA, le LoRaWAN[™] présente des fonctionnalités propres intéressantes pour ce cas d'usage :

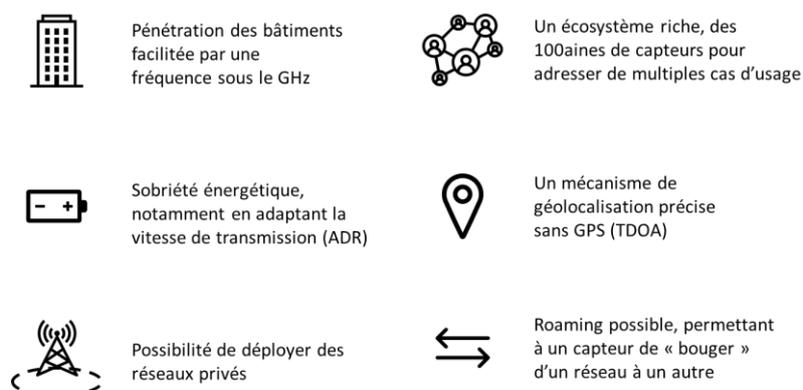


Figure 3 : le LoRaWAN présente des caractéristiques intéressantes pour le télérelevé des compteurs d'eau

2.2.2 NB-IoT

Le Narrowband-IoT (NB-IoT) est une technologie LPWAN particulière : elle est issue d'un standard cellulaire, défini par l'organisme 3GPP (3rd Generation Partnership Project), en charge de la production de spécifications techniques pour les réseaux mobiles (2G, 3G, 4G, 5G). Plus particulièrement, le NB-IoT a essentiellement été défini dans le « paquet » de spécifications *Release 13*, finalisé en 2016, puis a évolué lors des *Releases* suivantes (14, 15 et 16).

En tant que technologie cellulaire, le NB-IoT repose donc sur l'utilisation de bandes de fréquence soumises à l'obtention d'une licence. En France, il peut s'agir de bandes situées en dessous du GHz (700 MHz, 800 MHz, 900 MHz) ou au-dessus (1 800 MHz). Ces licences de fréquences sont délivrées par les agences nationales : en France c'est l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (ARCEP) qui est en charge de leur attribution.

L'avantage de cette technologie est qu'elle repose sur une infrastructure cellulaire existante (moyennant d'éventuelles évolutions ou licences logicielles), ce qui lui confère une couverture native très large. Par ailleurs, l'utilisation d'un spectre licencié permet également de limiter les éventuelles interférences.

En contrepartie, il est nécessaire de souscrire à un abonnement (de façon générale un peu plus coûteux que pour du LoRaWAN) pour la durée d'exploitation de l'infrastructure de télérelevé, soit 10 à 15 ans. Il peut néanmoins s'avérer difficile, si ce n'est impossible, d'obtenir un engagement tarifaire et de disponibilité de la part des opérateurs sur une telle durée.

D'autre part, dans le cas où un compteur NB-IoT serait hors couverture ou avec une mauvaise réception (sous-sol, intérieur de bâtiment très peu perméable aux ondes), il n'existe pas de solution simple pour améliorer la situation : seul un opérateur qui possède une licence peut ajouter une antenne, ce qui rend l'opération incertaine (car soumise à la volonté de l'opérateur et donc à ses objectifs de rentabilité d'exploitation) et coûteuse.

Trois modes de fonctionnement sont définis en ce qui concerne l'utilisation du spectre :

- Le mode *standalone*, dans lequel le NB-IoT utilise une porteuse GSM
- Le mode *guard band* (bande de garde), dans lequel le NB-IoT profite de blocs de ressources radio non utilisés à l'intérieur de bandes LTE. Il s'agit typiquement de blocs de fréquences en limite des bandes attribuées, permettant de limiter les interférences.
- Le mode *in-band*, dans lequel le NB-IoT utilise un bloc de ressource LTE (*Physical Resource Block, PRB*).

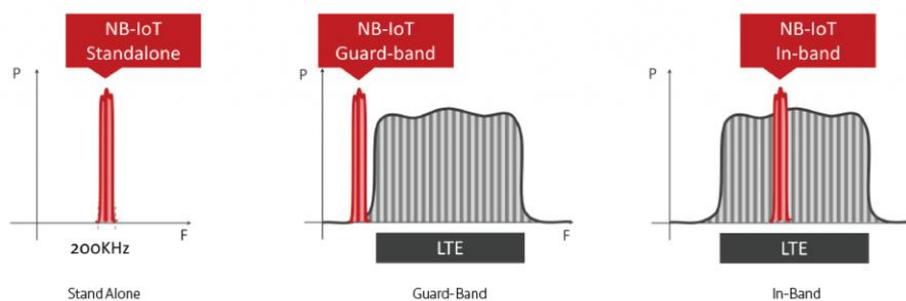


Figure 4 : Utilisation du spectre selon le mode de fonctionnement NB-IoT

Les caractéristiques du Narrowband-IoT le rendent particulièrement adaptés pour les cas d'usage où :

- Le contrôle et l'adaptabilité de la qualité de service sont essentiels,
- Les applications revêtent un caractère critique (ex : santé, sécurité),
- Les messages descendants, vers les capteurs, sont fréquents ou de tailles importantes,
- La consommation énergétique n'est pas le premier critère de choix, cette dernière étant notablement supérieure à celle d'autres technologies LPWA.

2.2.3 Wize

La technologie Wize est un type de réseau LPWA dérivé du standard Wireless M-Bus (EN-13757), initialement développé pour la collecte de compteurs.

Historiquement attribuée aux réseaux de pagers, l'ancêtre du SMS, la bande de fréquence 169 MHz (bande HERMES) a fait l'objet d'une ouverture en 2005, avec une affectation au télélevé de gaz et d'eau^{xx}. En France, les acteurs Suez et GRDF sont les principaux utilisateurs de cette bande de fréquence (notamment pour le compteur de gaz connecté Gazpar), à partir des années 2010.

Avec l'équipementier Sagemcom, Suez et GRDF ont constitué par la suite le consortium Wize Alliance pour la création d'une spécification commune : le Wize. D'autres acteurs privés ont depuis rejoint cette alliance, qui compte aujourd'hui 47 membres^{xxi} (dont Alciom, Diehl Metering, Itron...).

La technologie Wize est principalement déployée et opérée par GRDF (réseau Gazpar) et Suez pour le télélevé.

Le protocole Wize inclut quatre couches distinctes :

- La couche physique radio, qui précise le type de modulation utilisé ainsi que l'organisation de la donnée au sein des trames. Elle repose essentiellement sur l'utilisation de la bande de 169 MHz (même si d'autres fréquences peuvent être utilisées).
- La couche de liaison de données prévoit deux types de formats de paquets : le format de diffusion descendant *broadcast* (1 antenne émet à n capteurs), et le format descendant/remontant par défaut (1 antenne et 1 capteur dialoguent). Les capteurs Wize restent inactifs en dehors des transmissions, sauf pour une courte fenêtre d'écoute, ouverte peu après une transmission par le capteur.
- La couche de présentation indique les données complémentaires requises par le protocole d'échange ainsi que les mécanismes de sécurité utilisés.
- La couche d'application, qui précise le contenu fonctionnel des messages transmis.

3 ADOPTION DES TECHNOLOGIES POUR LE TELERELEVE

Si les technologies présentées dans ce document présentent des caractéristiques techniques parfois proches, elles présentent néanmoins des maturités différentes quant à leurs adoptions pour le marché du télérelevé par compteur communicant. Plusieurs critères peuvent être utiles pour apprécier ces différences :

- La diversité d'opérateurs
- La couverture réseau
- Le nombre de compteurs communicants déployés

Le coût des solutions technologiques est également un critère prépondérant, surtout dans le cadre de réseaux à grande échelle nécessaires pour le télérelevé des compteurs d'eau.

3.1 Diversité d'opérateurs

Le tableau suivant présente la liste des opérateurs existants en France pour les réseaux de télérelevé des compteurs d'eau.

Technologie	Opérateurs
LoRaWAN public	Orange, Netmore ²
LoRaWAN privé	Plus de 100 réseaux locaux privés, ainsi que des dizaines de collectivités
NB-IoT	SFR, Objenious (Bouygues Telecom)
Wize public	lowizmi
Wize privé	Bordeaux Métropole Energies, Suez

Tableau 6 : Opérateurs pour les réseaux de télérelevé en France

3.2 Couverture pour le télérelevé

La couverture réseau est analysée sous l'angle du nombre d'antennes déployées et disponibles pour le télérelevé des compteurs d'eau, et non en couverture théorique affichée par les opérateurs. D'une part car cela n'est pas applicable aux réseaux déployés en propre par les collectivités, d'autre part car le chapitre 4 démontrera que ces données sont généralement trompeuses pour le cas d'usage considéré.

² Netmore a annoncé en juin 2023 la reprise d'actifs LoRaWAN Objenious : <https://netmoregroup.com/news/med-anledning-av-aktuell-kommunikation-fran-polar-structure/>

Technologie	Antennes
LoRaWAN public	9 100
LoRaWAN privé	env. 10 000 ³
NB-IoT	env. 10 000
Wize	4 000+9000 ⁴

Tableau 7 : Nombre d'antennes disponibles pour le télérelevé d'eau en France, pour les différentes solutions technologiques

3.3 Compteurs communicants déployés

Le nombre de compteurs déployés est restreint aux compteurs d'eau, dans une optique de télérelevé, sur les réseaux de distribution d'eau potable. Ces valeurs sont estimées à partir des informations publiques et consolidées par ailleurs.

Technologie	Compteurs déployés en France ⁵
LoRaWAN	3 500 000
NB-IoT	<10 000
Wize	2 000 000 ⁶

Tableau 8 : Quantités de compteurs déployés en France pour le télérelevé

3.4 Coûts liés à la technologie

Différents coûts peuvent être considérés pour le choix d'une technologie de télérelevé, afin d'évaluer le coût total de la connectivité à l'échelle de temps long de l'exploitation d'une infrastructure de distribution d'eau potable et de sa solution de télérelevé.

³ Estimation : ces réseaux LoRaWAN sont opérés par de multiples acteurs, le nombre total d'antennes déployées n'est pas public.

L'utilisation pour le télérelevé de compteurs d'eau doit être étudiée au cas par cas.

⁴ 4 000 antennes du réseau Suez, auxquelles s'ajouteraient les 9 000 antennes du réseau GRDF (via lowizmi). Selon les éléments à notre disposition, il n'existe cependant pas d'offre lowizmi « catalogue », et l'utilisation du réseau est étudiée projet par projet.

⁵ Données de recherche Tactis

⁶ Chiffre estimé sur la base des projets Wize identifiés en France

	LoRaWAN™ avec relais	LoRaWAN™ sans relais	Wize	NB-IoT
Investissements en infrastructure à performance équivalente				
Abonnements				
Module radio				

Tableau 9 : Synthèse des différents postes de coûts liés à la technologie choisie pour le télérelevé

- **Coûts d'investissement du réseau**

Ils dépendent essentiellement du nombre de passerelles (gateways) à installer, pour soit établir une couverture globale dans le cas de l'établissement d'un nouveau réseau, soit densifier un réseau existant.

- **LoRaWAN** : les coûts relatifs aux passerelles (gateways) sont relativement réduits grâce à une offre large et concurrentielle ; l'essentiel des investissements concerne les frais de modélisation et d'installation. L'existence de réseaux publics à l'échelle nationale et de très nombreux réseaux locaux contribue à diminuer les besoins d'investissements.
- **Wize** : Le réseau n'étant pas présent dans toutes les géographies à l'heure actuelle (hors réseau Gazpar, pour le moment non disponible pour le télérelevé), les coûts d'investissement sont potentiellement plus importants car un déploiement complet est probable.
- **NB-IoT** : s'il est possible de financer des extensions ou densifications de couverture sur réseau mobile, celles-ci sont généralement réalisées pour des sites limités (usines, intérieur de bâtiment) car les coûts associés pour une couverture complémentaire large sont prohibitifs.

- **Coûts de l'abonnement (si utilisation d'un réseau existant) :**

Les trois technologies considérées disposent d'opérateurs nationaux et/ou locaux, qui mettent leurs réseaux à disposition moyennant l'acquisition d'abonnements. Les coûts associés dépendent essentiellement du volume de compteurs ainsi que du nombre de messages échangés.

- **LoRaWAN** : pour des volumes de plusieurs milliers de capteurs, les abonnements sur des réseaux tiers sont de l'ordre de quelques euros par an, pouvant descendre sous les 4€/an pour des volumes significatifs.
- **Wize** : les tarifs d'abonnement sur les réseaux Wize (GRDF ou Suez) ne sont pas publics, parfois accessibles dans les cahiers des charges de délégations de service public. Si les tarifs de connectivité sont globalement en phase avec ceux pratiqués sur le LoRaWAN, il est à déplorer que des frais annexes substantiels semblent généralement inclus (SI, intégration, etc.), alourdissant les coûts pour les parties prenantes.
- **NB-IoT** : s'ils dépendent également des volumes considérés et ne font pas l'objet de grilles publiques, les coûts d'abonnement du NB-IoT sont sensiblement plus élevés que sur les autres technologies.

- **Coût du module de communication :**

Les coûts liés aux modules de communication proviennent essentiellement de trois éléments : le module à proprement parler, l'antenne, et la batterie.

- **LoRaWAN** : les volumes importants de capteurs commercialisés sous la technologie LoRa et la relative simplicité associée permet de bénéficier de coûts avantageux sur les modules de communication. Sur la bande de fréquence 868 MHz, les antennes sont simples et petites (parfois même intégrées au circuit) et n'engendrent pas de surcoûts. La sobriété énergétique de la technologie diminue également les coûts associés à la batterie.
- **Wize** : les moindres volumes de capteurs, et l'intégration d'un module de puissance séparé engendrent des coûts supplémentaires pour les modules Wize. Les antennes nécessaires pour la bande de fréquence 169 MHz sont également plus encombrantes et onéreuses. Enfin, selon la configuration retenue, une batterie plus conséquente peut être nécessaire pour bénéficier de la plus grande puissance d'émission permise par la bande 169 MHz.
- **NB-IoT** : les volumes de capteurs commercialisés, notamment sur le marché asiatique, permettent de bénéficier de tarifs relativement avantageux pour les modules NB-IoT, malgré une relative complexité.

3.5 Conclusion

L'adoption des technologies pour le cas d'usage du télérelevé des compteurs d'eau montre une très forte tendance en faveur des réseaux LoRaWAN et Wize. Les éléments techniques fournis au chapitre 4 apportent des explications en ce sens. L'analyse des coûts de mise en œuvre amène aux mêmes tendances, bien que sur ce sujet LoRaWAN soit favorisé par la volumétrie mondiale.

Concernant les bénéfices attendus et les critères de performance, dans l'hypothèse de la mise en place d'un réseau LoRaWAN ou Wize dédié pour le télérelevé ou plus généralement pour les usages de la collectivité, ce sont le choix du partenaire technique déployant et opérant ce réseau, ainsi que le dimensionnement de l'infrastructure qui seront déterminants.

4 ANALYSE COMPARATIVE DE LA PERFORMANCE

L'analyse comparative de la performance s'appuie sur des critères techniques et physiques, qui sont en lien direct avec les critères de performance du réseau de télérelevé de compteurs d'eau. Le tableau ci-dessous présente le niveau d'impact des critères techniques sur la performance de la solution.

Performance	Taux de raccordement	Fréquence de relevé Taux de fraîcheur	Complétude des données
Couverture / Pénétration	★★★	★★★	★★★
Débit	Pas d'impact	Pas d'impact	Pas d'impact
Capacité	Pas d'impact	Pas d'impact	Pas d'impact
Largeur de bande	★	Pas d'impact	Pas d'impact
Gestion énergétique	★	★★★	★★★

Tableau 10 : Niveau d'impact des critères techniques sur la performance de la solution

Il apparaît distinctement que les deux critères principaux qui permettent de différencier les solutions technologiques pour le cas d'usage étudié sont la couverture/capacité de pénétration dans les bâtiments et la gestion énergétique.

Le tableau suivant présente une synthèse des différents critères étudiés dans ce chapitre, dont les deux principaux évoqués précédemment.

Critères	LoRa		NB-IoT	Wize
	Avec relais	Sans relais		
Couverture				
Pénétration dans les bâtiments				
Gestion énergétique				
Débit				
Capacité				
Largeur de bande	8 à 16 canaux de 125 kHz		3,75 kHz, 15 kHz ou 180 kHz	5 canaux de 12,5 kHz

Tableau 11 : Synthèse des niveaux de performance des technologies disponibles pour le télérelevé en France

4.1 Couverture et pénétration dans les bâtiments

La couverture fournie par les antennes et la pénétration dans les bâtiments sont des données techniques qui impactent directement tous les critères de performance du réseau mis en œuvre pour le télérelevé. En effet, le taux de raccordement dépend de la capacité du compteur à transmettre ses index sur le réseau. En cas de mauvaise pénétration dans les bâtiments, le taux de raccordement sera directement affecté. Il en va de même pour le taux de fraîcheur : si la moitié des communications transmises par le compteur n'atteignent pas le réseau, l'objectif de fréquence de relevé ne pourra pas être atteint. Enfin, toute donnée transmise par un compteur mais non reçue ne pourra être prise en compte, ce qui dégrade immédiatement la complétude des données.

Dans le cas des réseaux LoRaWAN et Wize, le choix des collectivités en France se porte généralement vers le déploiement d'une infrastructure pour le télérelevé des compteurs d'eau, voire dans le cadre d'un usage plus large concernant LoRa et sa large variété d'applications et d'équipements compatibles (exemple du SDEF). Cette configuration de projet implique une conception réseau qui vise à optimiser la couverture pour le périmètre souhaité. Il convient alors de considérer que les conditions de couverture sont équivalentes dans les deux cas et adaptées au besoin ; les éléments de performance peuvent cependant affecter la quantité d'antennes nécessaires pour obtenir cette couverture.

Dans le cas du NB-IoT, ou dans le cas de l'utilisation d'un réseau LoRa local ou national existant, la problématique de la couverture et de la pénétration dans les bâtiments est une donnée technique qui aura un impact direct sur les performances de la solution de télérelevé.

La couverture dépend directement du réseau d'antennes disponibles (voir chapitre 3.2) et de leur capacité à collecter les données des compteurs. Ce dernier facteur dépend de nombreux effets de bords et complexités inhérentes aux technologies radio, notamment en environnement urbain et péri-urbain peu favorables à la propagation. Dans le cas du télérelevé de l'eau, l'affaiblissement de cette propagation est un point central, les émetteurs (compteurs d'eau) étant généralement situés en sous-sol ou dans les bâtiments.

L'objectif de ce document est de présenter une approche comparative des solutions, ce chapitre garde donc volontairement une vision simplifiée des problématiques. De nombreuses études présentées en bibliographie documentent de manière très approfondie les éléments physiques et techniques associés à la performance de ces réseaux d'un point de vue de la propagation.

Le tableau suivant présente le comparatif technique simplifié des différentes solutions :

	LoRaWAN™ ^{xxii} ^{xxiii}	NB-IoT ^{xxiv} ^{xxv}	Wize ^{xxvi}
Hypothèse	SF7 – 5 500 bps ⁷	800MHz	2400 bps
Puissance de transmission typique (a)	14 dBm	23 dBm	14 dBm ⁸
Sensibilité typique (b)	-123 dBm	-141 dBm	-126 dBm
Affaiblissement de couplage maximum	137 dBm	164 dBm	140 dBm
Gain d'antenne capteur (c)	1 dBi	1 dBi	-8 dBi
Gain d'antenne récepteur (d)	6 dBi	8 dBi	3 dBi
Correction liée à la fréquence (e)	0 dB	0dB	14 dB
Bilan de liaison maximum	144 dBm	173 dBm	149 dBm

Tableau 12 : Bilan de liaison pour les différentes technologies de communication de télérelevé

⁷ La sensibilité du récepteur pour une communication plus lente (SF12), et donc plus énergivore, est de 137 dBm, soit une amélioration de 14 dBm pour le bilan de liaison maximum.

⁸ La bande 169 MHz autorise des émissions jusqu'à 27 dBm, en pratique il paraît peu pertinent de dépasser les 20 dBm pour des questions d'optimisation énergétique (consommation déjà multipliée par 4 à 20 dBm).

Parmi les éléments physiques et techniques qui influencent la capacité des compteurs d'eau à communiquer les informations de manière efficace et fiable, on retrouve :

- a) **La puissance de transmission de l'émetteur**, dans notre cas les compteurs d'eau, qui dépend de la technologie utilisée, de la puissance allouée dans l'équipement et des normes pour la bande concernée.

Les technologies LoRAWAN et Wize sont comparées à émission équivalente : l'hypothèse à 14dBm est prise pour la cohérence avec l'analyse de gestion énergétique et en accord avec la réalité des déploiements de projets dans le cadre du télérelevé des compteurs d'eau, où la durée de vie de la batterie est un élément prédominant pour le choix de la configuration.

Sans retour d'expérience sur le NB-IoT dans le télérelevé, la puissance typique de la littérature scientifique et de la norme est utilisée.

- b) **La sensibilité du récepteur**, ici l'antenne : sa capacité à « entendre » des signaux faibles. Plus la valeur absolue est élevée, meilleure est la sensibilité.
- c) **Le gain de l'antenne d'émission**, et les éventuelles pertes à l'intérieur de l'émetteur, qui augmentent ou diminuent d'autant sa puissance réellement émise.
- d) **La fréquence de communication**.

Une fréquence plus élevée a une propagation moins efficace et pénètre moins bien dans les bâtiments. La formule utilisée pour évaluer l'écart entre deux fréquences différentes est l'équation des télécommunications (ou formule de Friis), dont une formule en dB est :

$$\text{Affaiblissement de propagation} = 20\log_{10}(f_{MHz}) + 20\log_{10}(d_{km}) + 32,4 + \text{Pertes de propagation}$$

Considérant des conditions d'installation équivalentes, les paramètres de distance (d_{km}) et de pertes de propagations sont similaires. Le seul paramètre variable est la fréquence, qui avantage dans ce cas les basses fréquences et donc la technologie Wize qui utilise la bande des 169MHz, tandis que LoRaWAN et NB-IoT utilisent des bandes de respectivement 868MHz et 700MHz, 800MHz ou 900MHz (pour les applications visées).

- e) **Le bruit et les interférences**. Dans ce cas, ils sont considérés équivalents pour la simplification de l'analyse, ce qui est représentatif de la réalité observée.

Il convient de prendre en compte que ces données sont basées sur des cas typiques ; la réalité de mise en œuvre des différents composants dans un module de transmission d'un compteur d'eau communicant impose des compromis opérationnels qui impactent ces valeurs.

Les hypothèses de travail pour la comparaison des performances de couverture et pénétration sont prises en considérant qu'elles sont représentatives d'un grand nombre de projets déployés ; elles ne prétendent cependant pas couvrir l'ensemble des cas pratiques, la réalité des environnements étant très disparate.

Enfin, il convient de préciser que la bonne exploitation d'un réseau IoT vise à chercher un compromis entre investissements dans le réseau et le taux de pertes, plutôt que de cibler un taux de réussite sur 100% des messages émis. Un degré de redondance peut ainsi être inclus dans les messages envoyés pour assurer la collecte des données malgré une perte de certains messages.

Focus sur l'utilisation de relais :

Lorsqu'il est nécessaire de collecter des compteurs particulièrement isolés ou dans un environnement défavorable (plusieurs niveaux sous le RDC), une extension du réseau par l'installation de gateways peut s'avérer coûteuse pour un nombre limité de points.

Dans un souci d'optimisation des investissements, il est alors plus efficace d'avoir recours à des relais radio, idéalement auto-alimentés. Proche des compteurs tout en étant couvert par le réseau principal, le relais permet alors une collecte locale (protocole identique ou différent) et envoie ensuite les données vers une gateway.

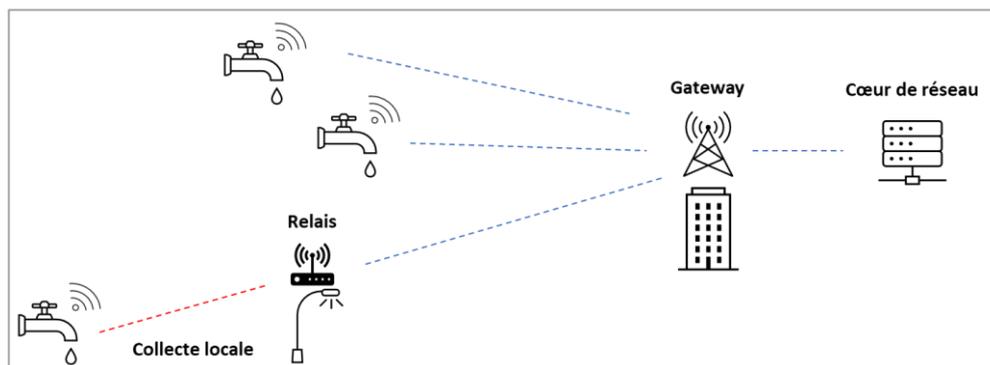


Figure 5: l'utilisation de relais permet une extension du réseau à coût réduit

Cette architecture est réalisable sans contraintes pour les technologies LoRa et Wize, moyennant l'existence de solutions matérielles. Bien qu'elle soit en théorie également possible dans le cas des réseaux NB-IoT, ces derniers sont soumis à licence et dépendent des opérateurs, ce qui restreint la faisabilité de mise en œuvre dans les faits.

Autant que possible, il est préférable de privilégier des relais utilisant le même protocole. L'Alliance LoRa annonçait ainsi fin 2022 une évolution de la norme permettant une extension de couverture LoRaWAN™ à partir d'un relais pouvant être auto-alimenté.

4.2 Gestion énergétique

Pour le télélevé des compteurs d'eau sur le réseau de distribution, qui sont alimentés sur batterie, la gestion énergétique est un critère prépondérant du choix de la solution technologique. En effet, si l'on souhaite obtenir une fréquence de collecte au moins journalière, voire horaire, la quantité de transmissions associées déterminera largement la durée de vie du produit avant son remplacement.

De plus, les conditions de mise en œuvre et notamment la localisation des compteurs amène à considérer les critères les plus défavorables en termes de transmission d'informations (débit réduit, répétitions de messages), qui impactent la consommation par communication.

La consommation énergétique des capteurs est majoritairement déterminée par trois briques de leur architecture technique interne :

- **Le capteur physique**, qui effectue la mesure que l'on souhaite contrôler : entrée « tout ou rien », analogique (4-20 mA, 0-10 V), capteur de CO₂, capteur de présence, sonde de température, etc. ;
- **Le cœur logique** comprenant un processeur et la mémoire ;

- **La structure radio**, prenant en charge la transmission du message, et potentiellement une partie de la gestion protocolaire.

Les deux premières briques sont indépendantes de la technologie radio retenue, et peuvent varier très significativement d'un cas d'usage à un autre, ou d'un constructeur à un autre. Par la suite, seule la partie radio est étudiée. Deux éléments sont à prendre en compte à ce sujet :

- **la quantité totale d'énergie** (en mAh) requise pour l'envoi d'un message, qui peut dépendre de la taille du message, de la vitesse de transmission, et de la puissance requise pour l'émission ;
- **la puissance de transmission nécessaire**, qui a un impact négatif sur la durée de vie de la batterie. Ainsi, pour une même quantité totale d'énergie, un courant faible est préférable.

Le tableau ci-après montre le comparatif du bilan de puissance pour l'émission d'un message sur les différents réseaux :

	LoRaWAN™ xxvii xxviii	NB-IoT xxix xxx xxxi	Wize ^{xxxii}
Hypothèse	SF7 14dBm	CatNB1	2 400 bps 14dBm
Taille du message (octets)	51		51
Entête protocole (octets)	13	Selon configuration	13
Total transmis (octets)	64	-	64
Débit max (bits par seconde)	5 500	62 500	2 400
Durée de transmission effective (ms)	118	86	215
Puissance de transmission (mW)	99 (3,3x30)	495 (3,3*150)	161,7 (3,3x49)
Charge de transmission (mW.s)	11,7	42,57	34,76

Tableau 13 : Bilan énergétique théorique pour la transmission d'un message de télérelevé vers le réseau

Il convient de prendre en compte que ces données sont basées sur des cas typiques ; la réalité de mise en œuvre des différents composants dans un module de transmission d'un compteur d'eau communicant impose des compromis opérationnels qui impactent ces valeurs.

Les hypothèses de travail pour la comparaison des performances de gestion énergétique sont prises en considérant qu'elles sont représentatives d'un grand nombre de projets déployés ; elles ne prétendent cependant pas couvrir l'ensemble des cas pratiques, la réalité des environnements étant très disparate. En particulier, les différentes technologies présentées incluent toutes des dispositifs permettant d'étendre la couverture (débit adaptatif, répétition, variation de la puissance d'émission) au prix d'une moindre autonomie du capteur.

La taille de message a été définie à l'identique pour LoRaWAN et Wize afin d'assurer la comparabilité des résultats. La réalité de mise en œuvre dans les différents projets peut varier.

4.3 Débit et capacité

Les réseaux LPWAN sont définis pour optimiser la portée des transmissions et la consommation énergétique des capteurs, généralement au détriment d'autres caractéristiques comme :

- La taille des données qu'il est possible d'envoyer, adaptée aux informations courtes (index de consommation, température, état de fonctionnement...);
- Le débit auquel les données sont envoyées, qui ne permet typiquement pas d'envoyer des vidéos;
- La latence des échanges de données, notamment pour ce qui est des messages descendants (vers le capteur), impactée par la mise en veille des capteurs.

Dans le cadre du télérelevé des compteurs d'eau, quel que soit le bénéfice attendu, le débit et la taille des données ont peu d'impact sur les critères de performance. En effet, le nombre de messages envoyés par les compteurs est limité par la fréquence de mise à jour souhaitée pour le projet, et l'infrastructure est calculée en conséquence. De même, la taille des messages reste faible, généralement inférieure à 100 octets, les seules données indispensables étant l'horodatage et la valeur de l'index.

Le tableau suivant est fourni à titre d'information technique, ce critère n'étant pas pertinent pour différencier les solutions dans le cas d'usage étudié.

	LoRaWAN™	NB-IoT	Wize
Débit minimal	250 bps	26 kbps (descendant) 62 kbps (remontant)	2,4 kbps
Débit maximal	11 kbps	127 kbps (descendant) 150 kbps (remontant)	6,4 kbps
Capacité du réseau	10 000 capteurs par gateway (avec une fréquence d'envoi de 10 messages par jour)	50 000 capteurs par station de base	10 000 capteurs par concentrateur

Tableau 14 : Débit et capacité théoriques pour les différentes technologies étudiées

5 REVERSIBILITE, FIN DE CONTRAT ET REPRISE DE L'EXISTANT

La possibilité d'assurer une continuité de service du télérelève en fin de contrat de délégation de service public, parfois appelée réversibilité sortante, est un sujet qui peut être laborieux s'il n'a pas été suffisamment anticipé. Plusieurs composantes doivent être étudiées, notamment :

- La gestion du réseau, et en particulier des infrastructures déployées,
- La gestion des capteurs.

En tout état de cause, la réflexion des collectivités doit permettre d'éviter un phénomène de verrouillage, qui pourrait limiter leur liberté de choix sur le plus long terme et s'accompagner de frais excessifs pour le maintien de services de télérelève.

	Extensions réseau	Capteurs
LoRaWAN™	Facile	Facile
NB-IoT	n/a	Facile
Wize	Limitée	Limitée

Tableau 15 : continuité de service / migration en fin de contrat

Cas du LoRaWAN :

Dans le cas de l'utilisation d'un réseau tiers (Orange, autre opérateur local), le nouveau délégataire ou la collectivité devra reprendre les abonnements auprès de l'opérateur, et éventuellement reconfigurer le routage des données vers une nouvelle plateforme. Ces deux opérations ne présentent pas de difficulté ou de risque financier particuliers.

Une alternative peut consister à migrer ces capteurs sur un autre réseau (existant ou à construire). Cette opération nécessite la déclaration des capteurs sur le nouveau réseau et une désactivation sur l'ancien réseau, ainsi qu'un nouvel appairage (déclenché ou récurrent par configuration).

Le cas Objenius en France, qui a annoncé mettre fin à la gestion de son réseau LoRaWAN et dont une partie des actifs serait repris par Netmore, a permis de démontrer (et d'améliorer) cette facilité de transfert d'opérateur. Il convient cependant de noter que les conditions tarifaires et les engagements de qualité de service peuvent évoluer, ces éléments étant liés à la relation contractuelle entre le client et l'opérateur.

Si la collectivité est propriétaire du réseau, le nouveau délégataire ou la collectivité pourra reprendre son exploitation. La popularité de la technologie LoRaWAN et la diversité de l'écosystème associé rendent aujourd'hui aisé l'accès aux ressources et compétences nécessaires.

Cas du NB-IoT :

De même que pour le LoRaWAN, le transfert d'abonnements NB-IoT et le routage associé ne présentent pas de difficulté particulière, d'autant plus que deux opérateurs nationaux disposent aujourd'hui d'offres NB-IoT : Bouygues Telecom et SFR.

Les extensions de réseau éventuellement financées par la collectivité n'ont en revanche pas vocation à devenir propriété de cette dernière (ce qui rend leur coût d'autant plus prohibitif). Leur migration n'a pas d'objet.

Cas du Wize :

Dans le cas de la technologie Wize, une prestation est généralement nécessaire pour permettre la continuité du télérelevé à partir des infrastructures de Suez, comprenant la connectivité ainsi que des prestations annexes relatives au système d'information.

Le lancement effectif des offres de connectivité d'lowizmi permettra d'offrir une alternative à ce schéma de fonctionnement. Il conviendra néanmoins de contrôler que la couverture existante, adaptée au télérelevé de compteurs de gaz (plutôt situés au rez-de-chaussée et en étage), permette un taux de collecte satisfaisant pour les compteurs d'eau.

Enfin, les infrastructures financées par la collectivité sont en théorie exploitables en propre (ou par un opérateur tiers). Une plus grande diversité dans les fournisseurs de solutions de cœur de réseau (aujourd'hui uniquement GRDF/lowizmi et Suez) permettrait de concrétiser cette possibilité et de limiter les risques de verrouillage technologique pour les acteurs.

6 EXEMPLES DE DEPLOIEMENTS DE COLLECTIVITES FRANÇAISES

6.1 LoRaWAN™ : SPL L'eau des collines

La SPL Eau des Collines gère le service de production et de distribution de l'eau potable des communes d'Aubagne, de la Penne sur Huveaune, Cuges les Pins et Saint Zacharie. A ce titre elle a lancé en 2021 un marché de renouvellement des compteurs d'eau potable de son réseau afin du moderniser et de permettre une meilleure qualité de service aux usagers : suivi de consommation, facture « au réel », détection de fuites, etc.

Cette modernisation passe par la transformation des compteurs existants en compteur communicant afin d'assurer de façon automatique et quotidienne la relève de ceux-ci. Cela représente un renouvellement complet (fourniture et pose de compteurs d'eau équipés de module radio) de l'ordre de 15 600 compteurs et la mise à niveau d'environ 2 500 compteurs plus récents (ajout uniquement d'un module radio aux compteurs pour les rendre communicants). Ces déploiements sont prévus entre septembre 2021 et décembre 2023 en fonction des communes.

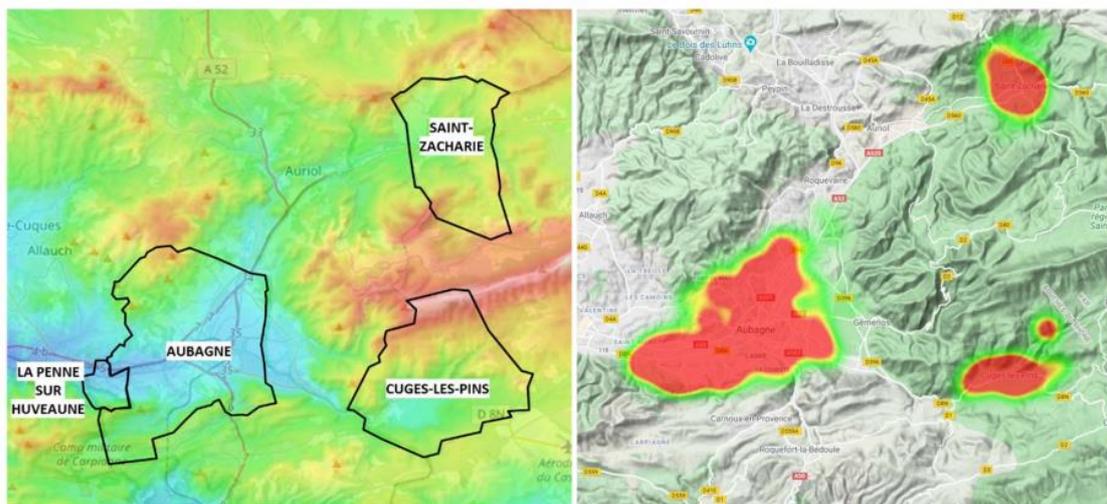


Figure 6 : Périmètre du réseau de compteurs d'eau connectés.

La collecte des données de relève des différents compteurs est assurée par un réseau de connectivité IoT basé sur la technologie radio LoRaWAN™, composé de :

- Passerelles radio (antennes radio) installées en hauteur qui permettent la collecte des données radio issues des compteurs communicants.
- Répéteurs installés lorsque la liaison radio est trop faible entre les compteurs et les passerelles. Les répéteurs assurent la communication radio des données des compteurs jusqu'à la passerelle.

Ce réseau a vocation à être mutualisé afin de permettre la mise en place d'autres services de connectivité aux communes dans une logique de « Smart City », notamment :

- **Eclairage public** : pilotage à distance des infrastructures, détection d'alertes, etc.
- **Stationnement** : détection des places libres, calcul de taux d'occupation des places, etc.
- **Efficacité énergétique des bâtiments** : télérelève multi fluide (eau, gaz, électricité) et détection d'anomalies
- **Qualité de l'air** : taux de dioxyde de carbone, de particules fines, mesure de la luminosité, du niveau de bruit, etc.

Le marché inclut également la mise en place :

- D'un portail permettant de visualiser et d'exporter les données de consommations quotidiennes relevées par les compteurs d'eau.
- D'un portail multi fluide permettant de visualiser les données des compteurs d'eau, de gaz et d'électricité pour les 4 communes concernées. Ce portail inclut également les informations relatives à la gestion du stationnement, au pilotage de l'éclairage public et de la qualité de l'air.

Les compteurs communicants émettent 2 fois par jour, pour une durée totale de transmission de 3,6 secondes. La puissance d'émission est inférieure ou égale à 25mW.

6.2 Wize : Télérelève de la Régie d'eau de Mulhouse

En 2013, à l'issue d'un appel d'offre, la Régie de Mulhouse attribue un marché de télérelève de compteurs d'eau à Ondeo Systems (groupe Suez). Ce marché comprend l'installation d'une infrastructure de 26 antennes sur la commune, le remplacement de 16 500 compteurs, et la mise en place d'une nouvelle solution de gestion des données et de la facturation, pour un montant de 3,5 millions d'euros. La phase d'implémentation de ce projet s'est étalée sur 24 mois. Une deuxième phase, actée en octobre 2016, a permis l'extension du réseau à 13 nouvelles municipalités pour 22 500 compteurs supplémentaires, soit un total de près de 40 000.

Aujourd'hui, le réseau de télérelève s'appuie sur environ 50 concentrateurs radios, dont environ 30 à Mulhouse. Le rayon moyen de collecte est annoncé entre 500m et 2 km. La régie de Mulhouse accède aux données des deux télérelèves journalières via le portail web Suez, avec un taux de collecte annoncé de 98%.

Les consommateurs peuvent également accéder à leurs factures en ligne, et mettre en place un suivi de consommation, ainsi que des alertes de surconsommation par email et SMS.

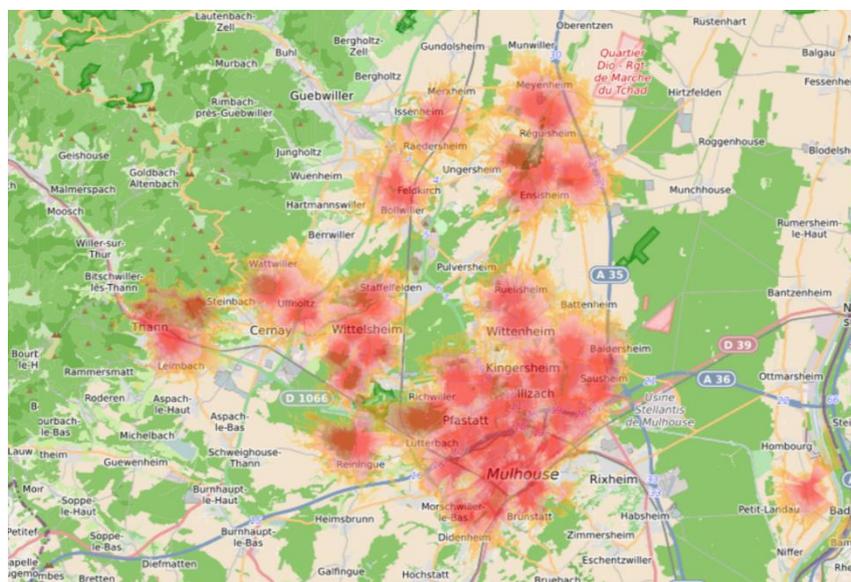


Figure 7 : Déploiement Wize dans l'agglomération de Mulhouse – Source : Wize Alliance

Les compteurs sont tous équipés d'un module radio Wize pour communiquer sur la bande de fréquence 169MHz. Les retours d'expérience terrain communiqués par la régie font état d'une autonomie des modules variant entre 5 et 10 ans. Le climat de Mulhouse peut expliquer cette relative moindre autonomie des capteurs : la fraîcheur hivernale est défavorable à l'autonomie des batteries, et pousse également à moins exposer les compteurs pour éviter le gel, et par conséquent à les enterrer un peu plus.

A ce jour, la régie n'envisage pas d'autres cas d'usages avec le réseau Wize déployé. Toutefois, le développement d'un outil permettant de corréliser des données de capteurs de fuite du réseau de distribution pourrait être envisagé.

6.3 LoRaWAN™ : Oélie, l'eau de Saint-Etienne Métropole

La Métropole de Saint-Etienne a mis en place une délégation de service public (DSP) pour l'alimentation en eau potable de 13 des 53 communes de la métropole. Cette délégation est exploitée par le groupe SAUR, sous la marque « Oélie, l'eau de Saint-Etienne Métropole ». Le nouveau contrat est entré en vigueur le 1^{er} octobre 2022 pour une durée de 13 ans.

Dans le cadre de ce contrat, le nouvel exploitant s'est engagé à généraliser le télérelevé des compteurs dans le cadre du renouvellement du parc. Le télérelevé devrait ainsi être installé sur plus de 118 000 compteurs. L'infrastructure de télérelevé concernera à terme de l'ordre de 80 gateways LoRaWAN répartis sur ce territoire. Le projet de déploiement devrait s'étaler sur trois années.

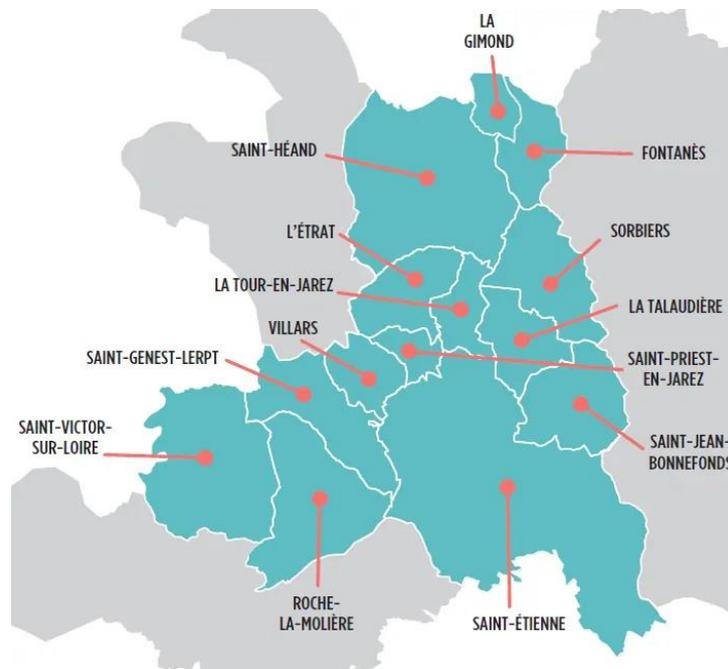


Figure 7 : Périmètre géographique du projet Oélie

Le projet est associé à des engagements contractuels par année (non publics) concernant le taux d'équipement, le taux de remontée des compteurs ainsi que la mise à disposition de services à destination des usagers : suivi de consommation via site ou application mobile, alerte fuite, alerte consommation inhabituelle...

L'analyse des données remontées, en lien avec les volumes produits et les mesures des compteurs de sectorisation, devrait également permettre une compréhension plus fine de l'état du réseau, ainsi que de la localisation de fuites potentielles.

Si le projet est aujourd'hui orienté vers des usages liés au réseau de distribution d'eau potable, la Saur est en discussion avec la collectivité et ses partenaires pour mettre le réseau de télérelevé LoRaWAN au service d'autres cas d'usages au bénéfice du territoire.

7 BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES

- ⁱ En 2023, la Préfecture des Yvelines a publié un arrêté de réduction des consommations d'eau le 13 mars : https://www.yvelines.gouv.fr/contenu/telechargement/29458/190106/file/CP_Secheresse_Yvelines_AlerteCentre.pdf
- ⁱⁱ Source : Synthèse - Mise en œuvre des mesures de restriction des usages de l'eau en période de sécheresse – Mai 2023 : publié sur le site du ministère de la transition écologique : <https://www.ecologie.gouv.fr/secheresse-economiser-leau>
- ⁱⁱⁱ Exemple d'illustration sur le site de franceinfo : https://www.francetvinfo.fr/meteo/secheresse/cartes-secheresse-suivez-en-temps-reel-le-niveau-des-nappes-phreatiques-et-des-cours-d-eau-en-france_5846957.html
- ^{iv} Exemple d'illustration sur le site de franceinfo : https://www.francetvinfo.fr/meteo/secheresse/enquete-franceinfo-secheresse-les-restrictions-d-eau-sont-elles-vraiment-efficaces_5983994.html
- ^v Smart Water Metering in Europe and North America - M2M Research Series – Second edition February 2022 *published by Berg Insights, author Levi Östling (ressource payante)*
- ^{vi} Source : Contrat de DSP du Sedif, 2011, page 12 : <https://www.sedif.com/sites/default/files/2022-10/Contrat%20DSP.pdf>
- ^{vii} L'eau du grand Lyon, actualité Teleo, 2017 : <https://met.grandlyon.com/teleo-le-compteur-deau-intelligent-arrive-dans-la-metropole/>
- ^{viii} Suez : Eau de paris les compteurs intelligents prennent la relève <https://www.suezsmartsolutions.com/fr/blog/eau-de-paris-les-compteurs-intelligents-prennent-la-releve>
- ^{ix} Suez : Références : <https://www.suez.fr/fr-fr/notre-offre/succes-commerciaux/nos-references/on-connect-le-mans>
- ^x Le Progrès, article du 24 septembre 2022 : <https://www.leprogres.fr/economie/2022/09/24/distribution-d-eau-potable-la-telereleve-va-etre-installee-sur-plus-de-110-000-compteurs>
- ^{xi} 35,6 millions de compteurs Linky déployés, 92% de foyers équipés, actualités Enedis : <https://www.enedis.fr/le-compteur-linky-un-outil-pour-la-transition-ecologique>
- ^{xii} Fin du déploiement de Gazpar en 2023, actualités GRDF : <https://www.grdf.fr/entreprises/dossiers-thematiques/residentiel/innovation-logements/compteurs-communicants>
- ^{xiii} Plateforme EcoWatt disponible sur : <https://www.monecowatt.fr/>
- ^{xiv} SEDIF, Rapport de conclusion de l'état des lieux du service de l'eau, 2021, pages 30 à 34 : https://www.sedif.com/sites/default/files/2022-10/SEDIF%20-%20Mission%202023_Rapport%20de%20conclusion%20de%20la%20phase%201%20-%20C3%A9tat%20des%20lieux%20du%20contrat%20Vdef%20280121.pdf
- ^{xv} Décret n° 2012-1078 du 24 septembre 2012 relatif à la facturation en cas de fuites sur les canalisations d'eau potable après compteur, source Legifrance : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026417603>
- ^{xvi} Low Power Wide Area Network (LPWAN) Market - By Component (Platform [Narrowband IoT, Long Term Evolution for Machines, LoRaWAN, Sigfox, Weightless], Services [Professional Service, Managed Service]), Deployment Model, Application, End-use, 2023-2032 par Global Market Insights (source payante)
- ^{xvii} Annuaire des membres LoRa Alliance : <https://lora-alliance.org/member-directory/>
- ^{xviii} Communication du SDEF sur le déploiement de son réseau LoRaWAN pour la connectivité des équipements énergies/fluides sur le territoire du Finistère : <https://www.sdef.fr/finistere-smart-connect-le-deploiement-des-infrastructures-a-demarre/>
- ^{xix} Couverture du réseau Orange LoRaWAN en France métropolitaine et corse : <https://www.orange-business.com/fr/reseau-iot>

^{xx} Arcep : le portail des bandes libres : <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/le-guichet-start-up-et-innovation/le-portail-bandes-libres.html>

^{xxi} Wize alliance members : <https://www.wize-alliance.com/Alliance/alliance-members>

^{xxii} Understanding LoRa adaptive data rate by Semtech, page 2 : https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/Understanding_LoRa_Adaptive_Data_Rate_Downloadable.pdf

^{xxiii} Performance Analysis of IoT and Long-Range Radio-Based Sensor Node and Gateway Architecture for Solid Waste Management : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2774>

^{xxiv} Session 5: NB-IoT Networks ITU Asia-Pacific Centre of Excellence Training On “Traffic engineering and advanced wireless network 1 planning”, Page 37 : https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/ITU-ASP-CoE-Training-on-/Session5_NB_IoT%20networks%20web.pdf

^{xxv} Power Consumption Analysis of NB-IoT and eMTC in Challenging Smart City Environments : https://cni.etit.tu-dortmund.de/storages/cni-etit/r/Research/Publications/2018/Joerke_GLOBECOM/Joerke_GLOBECOM_12_2018.pdf

^{xxvi} Alciom LoRaWAN vs 13757-4/N2 : A technical comparative analysis, page 9 : <https://www.wize-alliance.com/content/download/371/1648?version=1>

^{xxvii} Understanding LoRa adaptive data rate by Semtech, page 2 : https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/Understanding_LoRa_Adaptive_Data_Rate_Downloadable.pdf

^{xxviii} Performance Analysis of IoT and Long-Range Radio-Based Sensor Node and Gateway Architecture for Solid Waste Management : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2774>

^{xxix} Session 5: NB-IoT Networks ITU Asia-Pacific Centre of Excellence Training On “Traffic engineering and advanced wireless network 1 planning”, Page 37 : https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/ITU-ASP-CoE-Training-on-/Session5_NB_IoT%20networks%20web.pdf

^{xxx} Power Consumption Analysis of NB-IoT and eMTC in Challenging Smart City Environments : https://cni.etit.tu-dortmund.de/storages/cni-etit/r/Research/Publications/2018/Joerke_GLOBECOM/Joerke_GLOBECOM_12_2018.pdf

^{xxxi} Comparison of LoRa and NBLoT in Terms of Power Consumption <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1451892/FULLTEXT01.pdf>

^{xxxii} Alciom LoRaWAN vs 13757-4/N2 : A technical comparative analysis, page 10 : <https://www.wize-alliance.com/content/download/371/1648?version=1>