

Surveillance environnementale des sites industriels et urbains. Utilisation de réseaux de capteurs environnementaux

Etat de l'art technico-économique



C4H5O2_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000 1392.000 1
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

**SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE DES SITES
INDUSTRIELS ET URBAINS**

**UTILISATION DE RESEAUX DE CAPTEURS
ENVIRONNEMENTAUX**

ETAT DE L'ART TECHNICO-ECONOMIQUE

RAPPORT FINAL

juin 2021

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

RECORD, Surveillance environnementale des sites industriels et urbains. Utilisation de réseaux de capteurs environnementaux. Etat de l'art technico-économique, 2021, 169 p, n°19-0169/1A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

Comité de suivi de l'étude :

Jérôme ARNAUDIS - SUEZ, Rémy BAYARD -INSA DE LYON/RECORD, Caroline BOUCHET - SUEZ Solutions, Hélène BUEE - ENGIE, Adrien CAURANT - ENGIE, Bénédicte COUFFIGNAL - RECORD, Sophie COURTOIS - CIRCEE - SUEZ, Hélène DESQUEYROUX - ADEME, Yves DUCLOS - ADEME, Laurent DUPONT - SNCF, Philippe DUQUENNE - INRS, Guillaume GAY - MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, Nathalie GUISERIX - RENAULT, Michel JOUSSET - SUEZ, Catherine JUERY – TOTAL ENERGIES, Mohamed KRIMISSA - EDF, Emmanuelle OPPENEAU - SUEZ, Florent PINEAU - TOTAL ENERGIES, Thierry POLARD - SUEZ, Hélène ROUSSEL– ADEME

© RECORD, 2021

RESUME

La sensibilisation croissante de la société envers les pollutions de l'air, de l'eau et des sols, et leurs enjeux sur la santé et l'environnement, entraîne une forte demande de caractérisation de ces pollutions. L'arrivée des réseaux de télécommunications sans fil avec l'avènement des téléphones mobiles et depuis une dizaine d'année, le lancement de réseaux longue portée accompagnant les objets connectés (l'internet des objets, IOT), suggère l'opportunité de constituer des réseaux de capteurs environnementaux pour répondre à ce besoin accru d'analyses environnementales. L'étude a consisté dans un premier temps à recenser et à déterminer les lois, normes, directives ou motivations diverses susceptibles d'imposer ce type de réseaux d'analyses. Une des conclusions est l'absence de notion de réseau dans la législation.

Dans un deuxième temps nous avons dressé la liste et analysé les réseaux de télécommunications existants susceptibles d'être utilisés pour surveiller l'environnement. Face à la complexité dans les choix possibles, nous avons proposés des architectures réseaux pouvant correspondre à des configurations type. Une combinaison de plusieurs réseaux nous permet de répondre à toutes les demandes : réseaux longue portée et basse consommation LORA et SIGFOX, réseaux cellulaires 3G et 4G évoluant vers la 5G, réseaux cellulaires à faible consommation LTE-M et NB-IOT , réseaux satellitaires spécialisé dans l'IOT et réseaux courte portée WIFI et BLUETOOTH. .

Le traitement des données émanant des capteurs reste un challenge.

Le principal frein au développement des réseaux de capteurs environnementaux reste néanmoins la très faible disponibilité de capteurs fiables, bon marché. L'offre reste essentiellement cantonnée aux analyses de molécules simples ou de paramètres physiques plutôt que des molécules chimiques complexes. Une intensification de la recherche sur la détection de ces dernières (HAP, BTEX, perturbateurs endocriniens, pesticides) serait la bienvenue.

MOTS CLES

Réseaux de capteurs environnementaux, IOT, objets connectés, LORA, SIGFOX, NB-IOT, LTE-M, 3G, 4G, 5G, réseaux satellitaires, normes environnementales, microcapteurs

SUMMARY

The growing awareness of society regarding air, water and soil pollution, and their issues on health and the environment, leads to a strong demand for the characterization of these pollutions. The arrival of wireless telecommunications networks with the advent of mobile phones and over the last ten years or so, the launch of long-range networks accompanying connected objects and IOT (Internet of Things), suggests the opportunity to create of environmental sensor networks to meet this increased need for environmental analysis.

The study consisted initially in identifying and determining the laws, standards, directives or various motivations likely to impose this type of networks. Part of the conclusion is that there is no notion of such network in the legislation. Second, we listed and analyzed the existing telecommunications networks that could be used to monitor the environment. Faced with the complexity of the possible choices, we have proposed network architectures that can correspond to typical configurations. A combination of several networks allows us to meet all requests: long-range and low-consumption LORA and SIGFOX networks, 3G and 4G cellular networks evolving towards 5G, low-consumption cellular networks LTE-M and NB-IOT, specialized satellite networks in IOT and WIFI and BLUETOOTH short range networks.

The processing of data emanating from the sensors remains a challenge The main obstacle to the development of environmental sensor networks remains the very low availability of reliable, inexpensive sensors. The offer which remains essentially confined to simple molecule analysis or physical parameters, rather than complex chemical molecules. More research on the detection of the last mentioned (PAHs, BTEX, endocrine disruptors, pesticides) would be welcome.

KEY WORDS

environmental sensors Networks, IOT, connected objects, LORA, SIGFOX, NB-IOT, LTE-M, 3G, 4G, 5G, satellite networks, environmental standards, microsensors

SOMMAIRE

1	PREAMBULE	9
2	INTRODUCTION	10
3	ANALYSE DES BESOINS DE SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE DANS LES DOMAINES DE L'EAU, DE L'AIR ET DES SOLS	12
3.1	Synthèse de la demande pour des réseaux de capteurs de qualité de l'air	13
3.2	Synthèse de la demande pour des réseaux de capteurs de qualité de l'eau	15
3.3	Synthèse de la demande pour des réseaux de capteurs de qualité des sols	15
3.4	Absence de la notion de réseaux de capteurs dans les normes, décrets, BREF	16
3.5	Enjeux de la surveillance environnementale	16
4	LA SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE ACTUELLE	17
4.1	La surveillance environnementale vue du côté des industriels :	17
4.2	Surveillance environnementale dans le cadre urbain	17
4.3	La surveillance environnementale vue du côté état (enjeu sociétal) :	17
4.4	les pollutions/polluants actuellement suivis	19
4.5	Les outils actuels de surveillance :	22
4.6	Enjeux des réseaux de capteurs environnementaux	22
5	LES RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS	26
5.1.1	Glossaire « réseaux »	26
5.2	Préambule	27
5.3	Principe d'un réseau de capteurs	27
5.4	Protocoles	28
5.5	La sécurité des réseaux	32
5.6	Qualité de services (QoS, quality of service)	33
5.7	Maintenabilité/obsolescence/pérennité/évolutivité/saturation	33
5.8	Interfaçage des capteurs (environnementaux)	33
5.9	L'autonomie énergétique des capteurs d'un réseau	35

5.10	Les sources d'énergie possibles pour les capteurs autonomes	36
5.11	Les réseaux de télécommunications adaptés aux capteurs	38
5.12	Les typologies/scénarios réseaux proposés pour 7 configurations de sites	42
5.13	Exemples de modules capteurs du marché avec la fonction réseau (exemple système intérieur et extérieur)	58
5.14	La gestion des dispositifs (device management)	59
5.15	La gestion des données (data management)	60
6	RETOUR D'EXPERIENCES SUR LES RESEAUX SANS FIL :	61
6.1	Réseau LORA/LORAWAN	61
6.2	Réseaux cellulaires (GSM)	66
6.3	Quelques exemples de produits industriels	67
6.4	Statuts de la R&D sur les réseaux de capteurs	69
7	ANALYSE CRITIQUE DES DIFFERENTES SOLUTIONS PROPOSEES	70
7.1	Développer ou faire développer son réseau de capteurs environnementaux	72
8	CONCLUSIONS	74
9	PERSPECTIVES	75
10	LES SOURCES D'INFORMATIONS CONCERNANT LES RESEAUX	78
11	ANNEXES	83
11.1	Les Réseaux de transmission de données	83
11.1.1	La topologie des réseaux	83
11.1.2	Schéma de principe générique d'un réseau sans fil de capteurs	84
11.1.3	Les différents réseaux sans fil disponibles	86
11.1.4	La concurrence dans les réseaux / l'IoT	103
11.1.5	Les acteurs des réseaux de capteurs	104
11.1.6	Les réseaux filaires	117
11.1.7	Les réseaux satellitaires	117
11.2	Retours d'expériences	122
11.2.1	Réseaux de mesure de la qualité de l'air	122
11.2.2	Réseau de mesure de la qualité des eaux	130
11.2.3	Exemple d'un Réseau de surveillance de la qualité des cours d'eau du bassin Adour Garonne :	134
11.2.4	La télérelève des compteurs (eau gaz)	135
11.2.5	Réseaux de mesure de la qualité des sols	136
11.3	Gestion et traitement des données : plateformes et clouds	137

11.4	Rappels sur les ondes électromagnétiques	143
11.4.1	Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ,	143
11.4.2	Propagation des ondes électromagnétiques	153
11.4.3	Normes, réglementations et groupes de travail des radiocommunications	158
11.5	Rappel sur les ondes sonores et ultrasonores	160
11.6	Exemple de devis pour la réalisation d'un réseau de capteurs par un bureau d'études	161
11.7	LEXIQUE RESEAU	164

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : schema de principe d'un réseau de capteurs sans fil (RECORD 2021)	27
Figure 2 diagramme OSI	29
Figure 3 scénario 1 : site pollué en FRANCE sans couverture LORA (Orange ou Bouygues Telecom) ou couverture LORA mais de nombreux modules capteurs (> 10) (RECORD 2021).....	44
Figure 4 scénario 1 bis : site pollué en France avec couverture LORA (Orange ou Bouygues Telecom) et peu de modules capteurs (<10) (RECORD 2021)	45
Figure 5 scénario 2 :site pollué ou industriel mal desservi en internet ou site d'enfouissement des déchets en Europe (RECORD 2021)	47
Figure 6 scénario 3 : site pollué ou industriel, bien desservi en internet en Europe (RECORD 2021).....	49
Figure 7 scénario 4 : zone d'enfouissement des déchets en Europe , Sigfox (RECORD 2021)	51
Figure 8 scénario 5 : zone sans aucun reseau terrestre (RECORD 2021).....	53
Figure 9 scénario 6 : capteurs mobiles (RECORD 2021)	55
Figure 10 scénario 7 environnement souterrain (RECORD 2021).....	57
Figure 11 schéma de principe d'une station extérieure de mesure de la qualité de l'air connectée (RECORD 2021).....	58
Figure 12 schéma de principe d'une station d'analyse de l'air intérieur (record 2021).....	59
Figure 13 : influence de l'antenne sur la portée LORA	63
Figure 14: projet Mind4Stormwater : schéma simplifié du réseau de capteurs	66
Figure 15 schéma générique d'un réseau de capteurs	85
Figure 16 comparaison LTE-M vs NB-IOT	88
Figure 17 documentation Orange business services	90
Figure 18 réseau , document Objenius	91
Figure 19 passerelle LORA 1 canal (300 capteurs connectables) vers internet (50 €)	94
Figure 20 schéma de principe de la passerelle.....	94
Figure 21 passerelle LORA	94
Figure 22 schématique du module LORA/SIGFOX de MURATA (CMWX122ABZ)	95
Figure 23 module multi protocoles de PYCOM	95
Figure 24 Document extrait de la page de STMicroelectronics sur W M_BUS	99
Figure 25 schéma de principe d'un microcontrôleur transmetteur de TI, le CC1310.....	100
Figure 26 les briques structurelles de l'IOT (extrait du site RS).....	108
Figure 27 extraite du site de ATMO France	125
Figure 28 copie d'écran du portail sur la qualité des eaux souterraines.....	133
Figure 30 architecture d'un réseau utilisant le logiciel ThingPark Enterprise (device management) .	140
Figure 31 architecture plateforme PCVUE	140
Figure 32 exemple de cone d'émission d'une antenne	149

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 les besoins de mesurer la pollution peuvent être classifiés selon les objectifs suivants (RECORD 2021):	12
Tableau 2 polluants suivis dans l'air (RECORD 2021)	19
Tableau 3 polluants suivis dans l'eau (RECORD 2021).....	19
Tableau 4 polluants rencontrés dans les sols (RECORD 2021)	20
Tableau 5 trame d'un message fictif :.....	26
Tableau 6 comparaison modèle OSI vs TCP/IP.....	31
Tableau 7 : réseaux pouvant constituer des réseaux de capteurs (RECORD 2021)	39
Tableau 8 prix estimatif d'une station de mesure extérieure (hors capteurs)	59
Tableau 9 prix estimatif d'une station d'analyse intérieure (hors capteurs)	59
Tableau 10 portée fonction de la hauteur des antennes.....	71
Tableau 11 le nombre d'antennes GSM en France par opérateurs.....	86
Tableau 12 : exemples de capteurs environnementaux "basique"	105
Tableau 13 liste des plus gros microelectroniciens et leur implication dans l'IOT	106
Tableau 14 liste des principaux fabricants de modules pour réseaux sans fil.....	107
Tableau 15 comparatif integrateurs/distributeur/architectes chaine IOT complete ou partielle (RECORD 2021).....	116
Tableau 16 propriétés des différents réseaux sans fil (RECORD 2021).....	119
Tableau 17 les missions de COPERNICUS.....	127
Tableau 18 exemples de plateformes IOT	138

Définitions des termes employés dans le document

capteur	élément sensible qui transforme une grandeur physique ou chimique en signal électrique
microprocesseur	composant électronique sur une puce de silicium muni de fonctions de calcul ,et d'entrée/sorties multiples
microcontrôleur	microprocesseur avec une fonction spécifique de calcul
module	ensemble de composants électroniques montés sur un circuit imprimé pouvant réaliser des fonctions sophistiquées (calculs, émetteur/recepteur etc)
module capteur	module sur lequel on a raccordé, en interne ou en externe du boîtier , un ou plusieurs capteurs
analogique	signal électrique qui peut prendre toute valeur discontinue
Signal digital ou numérique	signal qui ne prend que 2 valeur : 0 ou 1
SOC	systeme on chip :en général un microprocesseur muni d'un transmetteur RF (radiofréquence)
entrées/sorties	connexions physiques (plots à souder ou à visser) permettant de communiquer avec un composant électronique
transmetteur	Puce électronique qui envoie ou reçoit des signaux électriques via une antenne
Système embarqué	Système électronique et informatique autonome qui assure une fonction spécifique (un gps portable, un ordinateur automobile, un drone etc)

1 Preambule

L'objet de l'étude est de constituer un état technico économique des réseaux de surveillance environnementale dans les sites industriels et les sites urbains.

Méthodologie de l'étude

L'étude a été menée :

- pour la partie « réseaux » : en alternant étude bibliographique sur internet et entretiens téléphoniques avec des distributeurs de composants, des fabricants de capteurs ou de modules de capteurs, des bureaux d'études, des sociétés de services informatiques, des opérateurs de télécommunications. C'est ajouté l'expertise et l'expérience personnelle de l'auteur de ce rapport dans les réseaux de capteurs sans fil
- pour la partie « retour d'expériences » : en interrogeant les responsables des laboratoires ayant participé aux projets. Le retour d'expérience des industriels est toujours délicat à obtenir de manière objective étant donné le contexte concurrentiel
- Pour la partie « besoins en surveillance environnementale : demandes de contact sur le réseau social linkedin (plus de 100 demandes) et contact par email en utilisant les organigrammes de collectivités territoriales (régions, départements, métropoles ou communes) , des ministères, et des entreprises ainsi que les emails trouvés dans des comptes rendus de réunion (AASQA etc.). Le taux de réponses a été particulièrement bas, inférieur à 5%.
- Une étude bibliographique quasi exhaustive des réglementations et guides concernant l'environnement a été entreprise au niveau communal, départemental, régional, national, européen et mondial

2 INTRODUCTION

Le contexte

La demande pour le suivi/surveillance de l'environnement s'accroît d'année en année. Elle suit la progression rapide des prises de consciences environnementales. Tous les acteurs politiques ont commencé à relayer les préoccupations exprimées par les scientifiques concernant l'environnement, aiguillonnés par le spectre d'un réchauffement climatique mis en exergue par le GIEC.

De très nombreuses organisations/institutions internationales, nationales et régionales, débattent, légifèrent, proposent des mesures sur les thèmes de l'environnement (pollution, changement climatique, biodiversité).

Les textes réglementaires européens et français concernant l'environnement incluent quasi systématiquement une clause imposant l'information du public. Ce qui signifie l'importance grandissante de la nécessité de mesurer et traiter les paramètres issus de l'environnement.

De très nombreuses données environnementales sont donc maintenant accessibles au public grâce à de nombreux sites gérés par des administrations (eaux, air extérieur, sols pollués)

Les 2 grands thèmes environnementaux que sont le réchauffement climatique et la pollution de l'air sont intimement liés puisque les GES (gaz à effet de serre) principaux, le CO₂ ou le CH₄, qui ne sont pas des polluants ayant des effets néfastes sur la santé aux teneurs rencontrées dans l'atmosphère, accompagnent très souvent ces derniers en tant que sous produits de combustion ou de fermentations. Un bon exemple de double contribution GES/polluants est le transport routier : générateur à la fois de CO₂ et de molécules organiques polluantes dérivées de la combustion plus ou moins complète des hydrocarbures.

Les mesures des niveaux de pollution se font généralement grâce à des appareils d'analyses sophistiqués et coûteux qu'il faut calibrer périodiquement.

Souvent les mesures se font par prélèvement suivi d'une analyse ultérieure en laboratoire. Ce qui est particulièrement le cas dans le domaine de l'eau.

Cette procédure lourde réduit le nombre de mesures par territoire et en fréquence.

Depuis 10 ans, l'apparition de réseaux de télécommunications sans fil longue et très longue distance, lancés par la société française SIGFOX, laisse augurer la possibilité d'obtenir plus de mesures et dans plus d'endroits.

Mais la condition d'un réel succès, c'est-à-dire le suivi environnemental quasi intégral des sites, de manière autonome, est la disponibilité de capteurs simples, peu onéreux, multiparamétriques, et fiables, qui pourront se raccorder aux réseaux sans fil privés ou dépendant d'opérateurs. Ce n'est pratiquement pas le cas aujourd'hui.

Le développement conjoint de microcapteurs pour détecter certains gaz « simples » et de réseaux sans fil faible coût, a néanmoins permis l'émergence de start up qui proposent des microcentrales de surveillance de la qualité de l'air à la fois industrielles, d'un coût encore très élevé (quelques milliers d'euros), mais la concurrence devrait faire baisser les prix, et domestiques, d'un coût modéré (quelques centaines d'euros voire quelques dizaines d'euros).

L'offre en capteurs et microcapteurs reste cependant limitée à la température, humidité, bruits et la détection de molécules simples de type CO₂, CH₄, NO_x, CO, NH₃, H₂S, le taux de particules (sans analyse de la composition des particules mais avec indication de leur taille).

Dans le domaine de l'eau, les capteurs de hauteur d'eau ultrasonores, les débitmètres, les sondes optiques d'oxygène dissous et les sondes de pH ou ioniques permettent un suivi à distance utilisé depuis plus de 15 ans grâce à des liaisons radio. Il ne s'agit plus de microcapteurs. Une tendance à l'utilisation de dispositifs échantillonneurs intégratifs, sur plusieurs semaines ou mois, va à l'encontre de la mesure en continue mais permet de moyenniser et quantifier des espèces pour lesquels on ne dispose pas d'analyse en ligne. Ces dispositifs ne bénéficieront pas des réseaux de capteurs, l'analyse des espèces chimiques piégées se faisant au laboratoire.

La fiabilité, la stabilité dans le temps, les interférences entre espèces chimiques, des microcapteurs ne sont pas encore optimales et dignes de confiance. Le challenge microcapteurs, organisé par AIRLAB/AIRPARIF, annuel depuis 2018 permet d'avoir une bonne vision de ce marché et de la qualité des produits proposés. On pourra remarquer que la qualité n'est pas liée au prix.

Les principaux polluants toxiques tels que les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), les BTEX (Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes), les PCB (polychlorobiphényles), les COVH (COV halogénés) les métaux (Hg, Cd, Pb, As), les pesticides, les perturbateurs endocriniens, restent encore inaccessibles aux microcapteurs.

Cette situation explique très certainement le fait qu'il n'existe pas aujourd'hui de contraintes réglementaires qui encourage l'utilisation de réseau de capteurs environnementaux. Leur utilisation reste donc motivée par le souci d'une meilleure compréhension des pollutions.

Dans ce cadre restreint, les industriels et les collectivités peuvent néanmoins, dès maintenant, tirer parti du développement rapide de l'internet des objets (IoT) qui a pour vocation de multiplier le suivi des objets et des personnes grâce à l'utilisation de nombreux réseaux sans fil qui se sont développés depuis 10 ans.

C'est une bonne opportunité pour les industriels pour améliorer leur image de marque au niveau du public et pour les institutionnels de répondre à la pression informationnelle du public.

Le rapport est organisé de la manière suivante :

La première partie concerne la surveillance environnementale :

Quels sont les besoins exprimés, les obligations et les motivations des industriels et des collectivités. Les enjeux sociétaux de la surveillance environnementale sont soulevés. La surveillance actuelle est décrite à la fois en terme d'espèces chimiques à surveiller et en terme d'outils de suivi. Les enjeux capteurs sont mis en exergue.

La deuxième partie concerne spécifiquement les réseaux de capteurs et plus particulièrement les réseaux de télécommunications sans fil qui servent de support à la mise en réseau de capteurs*, c'est-à-dire à leur insertion/interconnection dans un système complet d'acquisition et de traitement de données émanantes de ces capteurs : Qu'est ce qu'un réseau, comment le choisir et comment le constituer. Des exemples concrets, correspondant à différents scénarios de surveillance, sont proposés ainsi qu'un retour d'expériences.

Une large part de l'étude est positionnée en annexe pour permettre d'approfondir chaque domaine si nécessaire sans peser sur une écriture concise en première partie qui répond à un questionnement d'une première approche du sujet.

*** réseau de capteurs : un ensemble de capteurs répartis sur une zone géographique ou dans des bâtiments interconnectés à l'aide d'un ou plusieurs réseaux de télécommunications**

3 Analyse des besoins de surveillance environnementale dans les domaines de l'eau, de l'air et des sols

Tableau 1 les besoins de mesurer la pollution peuvent être classifiés selon les objectifs suivants (RECORD, 2021):

Entité demanderesse	Objectif de la demande
Les politiques/administrations	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation des mesures prises pour réduire les pollutions • Information du public • Déclenchement des seuils d'alertes suivies d'actions protectrices des populations • Identification des pollueurs • Meilleure estimation des couts sociaux économiques des pollutions (cout due aux problèmes de santé induits)
Les Scientifiques	<ul style="list-style-type: none"> • Etudes sur les pollutions (nature et source des polluants, impacts présents et futurs sur l'environnement et les populations) • Suivi individuel de l'exposition aux polluants (exposome) pour établir le lien entre pollution et santé
Les industriels	<ul style="list-style-type: none"> • Déclenchement de seuils d'alerte pour respecter la réglementation • Déclenchement de seuils de sécurité pour éviter les accidents • Régulation des rejets pour éviter les pénalités • Régulation des dispositifs de ventilation des locaux
Le public	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle de la pollution dans l'habitat (pour en diminuer ou supprimer les sources internes et s'isoler des sources externes) • Suivi personnalisé de l'exposition aux polluants • Choisir un lieu d'habitation plus sain • Agir pour l'environnement
Les associations de défense de l'environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôler les diverses pollutions pour alerter les services publics, le public, les medias • Contrôler pour d'éventuelles actions en justice

3.1 Synthèse de la demande pour des réseaux de capteurs de qualité de l'air

La qualité de l'air et son lien avec la santé est le sujet de préoccupation majeur lorsqu'on parle environnement. Celle que le citoyen ressent en moyenne 16 fois par minute dans l'acte vital qu'est la respiration.

L'OMS a été la première (1987, guide de la qualité de l'air pour l'Europe, 28 polluants) à définir et proposer des seuils limites de différents polluants à atteindre pour un air sain, c'est-à-dire

- ne présentant pas de risques pour les populations en n'induisant pas de maladies ou ne réduisant pas l'espérance de vie (le premier rapport de l'OMS « air pollution » de 1958, timide vis-à-vis des effets de la pollution sur la santé, ne prévoyait pas de normes de pollution)
- ne présentant pas de risques pour l'environnement et la biodiversité.

L'Europe s'est approprié ces seuils avec un décalage de quelques années. Seuils qui ont ensuite été transposés dans la législation française avec un délai supplémentaire de quelques années.

A terme on peut estimer entre 10 à 15 ans le temps nécessaire pour que les limites maximales recommandées par l'OMS soient imposées en France. Dans certaines grandes villes françaises et européennes, le dépassement des limites (NO₂ en particulier), imposées par l'Europe, est encore permanent ou fréquent.

Demandes issues de la réglementation française :

C'est principalement la pollution de l'**air extérieur** globale (sur des zones de plusieurs dizaines de kilomètres carrés) qui est réglementée et suivie de manière officielle par des laboratoires agréés à l'aide de méthodes agréées. Les normes, les seuils ainsi que les procédures d'agrément sont définis par décrets ou arrêtés dans la législation française.

Elle suit la législation européenne, exprimée sous forme de directives (ex : 2006/60/CE) auxquelles doivent se conformer les pays européens sous un délai fixé dans les dites directives, sous peine de sanctions.

La législation sur la surveillance environnementale directe et continue des émetteurs de polluants (industrie et agriculture) est déterminée de manière très locale par des arrêtés préfectoraux se référant à des lois ou décrets nationaux généralistes (exemple article L515-8 du CE : installations qui peuvent présenter des **dangers ou des inconvénients** soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publique...).

La qualité de l'**air intérieur** est réglementée en France uniquement pour les lieux accueillant du public en particulier les écoles, et dans les lieux de travail, avec des contraintes sur le renouvellement de l'air plutôt que sur la nature des polluants. L'habitat domestique ne fait pas l'objet de contraintes environnementales réglementaires, alors que les personnes y passent 2/3 de leur vie et que des sources de pollution différentes de celle de l'air extérieur aient été identifiées (exemple : COV des moquettes, meubles, HAP issus de cuisson, de foyers ouverts).

Les polluants extérieurs à mesurer en continu du fait de la réglementation française se résument aujourd'hui à **12 polluants**:

dioxyde de soufre SO₂, oxydes d'azote NO_x, matière particulaire PM₁₀ et particules fines PM_{2.5}, plomb, monoxyde de carbone CO, benzène C₆H₆, ozone O₃, arsenic, cadmium, nickel et hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP

En France, Le LCSQA les AASQA (ATMOS) remplissent les besoins réglementaires et parfois vont au delà en ce qui concerne la mesure de pesticides, non obligatoire aujourd'hui mais en phase d'estimation (ANSES).

Les instances sanitaires sont principalement motivées par l'établissement du lien entre pollutions et santé.

L'approche pour l'établissement de ce lien est aujourd'hui essentiellement concentrée sur la bio surveillance grâce à l'utilisation de bio marqueurs (vérification du taux de polluants chez les individus par campagnes de dépistage et d'analyses sanguines et des cheveux) et la recherche de corrélations grâce à des modèles configurés pour faire la synthèse de ce que les individus ont inspiré au cours de leur vie.

La modélisation, permettant de palier le manque de données de mesures au niveau individu, est fortement dépendante des hypothèses pour l'établir (données de la qualité de l'air ambiant, données d'émissions, elles mêmes résultant de simulations, modèles de dispersion). Elle est donc remise en cause. Elle ne rendrait pas compte de la réalité de manière suffisamment fidèle. Par exemple, il a été

plusieurs fois mentionné dans les sources de ce rapport que le taux des polluants peut varier de manière très significative entre 2 endroits espacés de quelques mètres (métros, habitations, environnements de périphériques routiers). Les données d'émission, basées sur les déclarations des industriels sont sujettes à caution, en particulier celles concernant les émissions des véhicules.

D'où la tentation de préconiser des capteurs liés aux individus que l'on retrouve dans plusieurs rapports (exemple : essai réalisé sur 20 000 personnes en Hollande).

Le concept d'exposome a été créé (2005) pour tenter de donner réalité à l'exposition réelle et cumulée subie par un individu.

Un moyen plus juste d'avoir accès à l'exposome des individus serait d'avoir des mesures des taux de polluants faites dans son environnement proche.

Les seuils des normes devraient être abaissés (plusieurs ne sont pas encore aux valeurs recommandées par l'OMS en 2005 en particulier l'ozone sur longue durée d'exposition)

La nécessité de suivre les particules ultrafines (<0.1µm), la carbone suie, le carbone organique et les pesticides (plusieurs études en cours) est mentionné dans plusieurs rapports.

En ce qui concerne la qualité de l'air intérieur, la moisissure semble insuffisamment prise en compte malgré le fort taux rencontré dans 47% des logements.

Demandes issues des AASQA et OQAI

Le matériel d'analyse actuel donne visiblement satisfaction puisqu'il est en général spécifié dans les normes et alimente avec succès les sites internet destinés à l'information du public et à la surveillance réglementaire de la pollution de l'air extérieur (dite aussi ambiante).

Il ne semble pas exister une forte demande pour la mise en place des réseaux de microcapteurs. Si de tels réseaux de microcapteurs venaient à être utilisés par les AASQA, il serait nécessaire de toute manière, en l'état actuel de dérive et de non fiabilité des microcapteurs, de les calibrer avec les analyseurs normés de manière périodique, ce qui alourdit leur mise en œuvre et le coût de leur déploiement.

Une veille technologique permanente ainsi qu'une évaluation des microcapteurs, munis systématiquement de moyen de communications sans fils de type GSM, Sigfox ou Lora, est assurée par le LCSQA avec l'assistance des AASQA.

Des expérimentations sur plusieurs centaines de microcapteurs mobiles se déroulent depuis quelques années (pollutrack, atmotrack) principalement à Paris.

Conclusions sur les demandes en réseaux de capteurs de suivi de l'air :

Mesurer pour agir :

L'argumentation principale pour une prolifération de capteurs de surveillance de la pollution, et donc l'installation de réseaux de capteurs, est de pouvoir compléter les données actuellement fournies par les AASQA afin d'affiner les données relatives à l'exposition des personnes aux polluants de l'air.

Ces données permettront de mieux comprendre le rapport entre santé et environnement pour réduire les atteintes au bien être des citoyens, le nombre de malades ou de morts prématurés attribués aux pollutions environnementales et mieux comprendre le rapport entre pollutions et dégradation durable de l'environnement qui affectent la planète dans sa globalité (espèces vivantes et milieux naturels).

Le deuxième argument, qui va dans le sens d'une augmentation substantielle des capteurs environnementaux, est une meilleure identification des sources de polluants pour œuvrer à leur diminution.

Le troisième argument tient dans la nécessité de plus et mieux analyser, grâce à des capteurs, pour déterminer de manière plus fiable les seuils adéquats de pollutions qui serviront à informer les administrations, les exploitants et les populations locales des dangers imminents (prévention), des accidents en cours et des dangers latents.

Mesurer pour informer :

Il est devenu essentiel d'informer le public soit directement au travers de sites internet soit indirectement au travers d'associations en charge d'œuvrer pour l'environnement.

L'alimentation de ces sites internet par des réseaux de capteurs autonomes faciliterait la restitution des mesures à la population.

3.2 Synthèse de la demande pour des réseaux de capteurs de qualité de l'eau

Tout comme l'air (intérieur et extérieur) il y a deux eaux pour le public : celle que l'on consomme et celle des rivières et étendues d'eau.

La qualité de l'eau de consommation, vu du public, se résume souvent à son goût : l'eau est-elle chlorée ou non ? Les diverses autres pollutions ne se sentent pas et demeurent donc quasiment ignorées et inconnues du public hormis quand il reçoit annuellement la facture du syndicat des eaux accompagnée d'un bulletin d'analyse, très souvent conforme.

Le public, en revanche, considère que l'eau des rivières ou du lac est globalement polluée mais puisqu'il n'en souffre pas directement, exerce une pression moindre sur l'état.

Les problématiques de l'eau sont quasiment identiques à celles de l'air

- Identification de polluants sophistiqués (substances émergentes tels les résidus pharmaceutiques, les pesticides)
- Identification des pollueurs
- Impact des polluants sur l'écosystème

Une partie des analyses se fait à l'aide de capteurs classiques de type électrodes ou capteurs électrochimiques (pH potentiel redox ions métalliques), capteurs optiques (oxygène dissous) ou niveau/débits connectés par les réseaux existants.

Pour les micropolluants avérés, notamment de type pesticides, métaux, métalloïdes etc., **le besoin d'outils fiables de détection et de quantification *in situ*, donnant des informations plus globales et plus intégrées, demeure toujours d'actualité.**

Les analyses des micropolluants se font aujourd'hui principalement par prélèvements suivis d'analyses en laboratoire. Les systèmes intégrateurs passifs, bénéficiant actuellement d'un fort intérêt, destinés à capter sur une longue période les polluants présents en très faible quantité, nécessitent aussi des analyses de laboratoire. Leur mise en réseau semble donc problématique et nécessiterait une méthode de détection *in situ* qui reste encore à développer.

Les réseaux de capteurs environnementaux se limitent donc aux capteurs « simples ». Leur prolifération pourrait néanmoins permettre des détections plus rapides d'incidents/accidents et réduire leur impact.

3.3 Synthèse de la demande pour des réseaux de capteurs de qualité des sols

Les sites et sols pollués souffrent principalement de la nécessité d'un suivi à des échelles de temps longs (plusieurs années) et parfois d'un éloignement des habitations.

L'anticipation de la migration des pollutions nécessite une connaissance parfaite de la géologie du sous-sol, de la nature du ou des polluants ainsi que la quantité enfuie et des modèles mathématiques validés.

La prolifération des forages d'analyse (les piézomètres) et de leurs capteurs associés seraient un sérieux atout pour le suivi par exemple de la pollution des eaux souterraines. Des réseaux de capteurs connectés pour des systèmes longues distances de type LORA, SIGFOX, LTE, NB-IOT sont tout à fait appropriés.

3.4 Absence de la notion de réseaux de capteurs dans les normes, décrets, BREF

La notion de réseau de capteur n'apparaît pas dans les textes législatifs et ne constitue donc pas une obligation. Ce n'est que lorsque la maturité des réseaux de capteurs adviendra que la législation pourra éventuellement les prendre en compte.

3.5 Enjeux de la surveillance environnementale

Les très nombreux textes militants pour un meilleur respect de l'environnement atteignent rarement le niveau du détail technique. Seule la mention « surveillance de la pollution » laisse suggérer qu'il faut mesurer/analyser les polluants.

La notion et l'utilisation du terme « réseaux de capteurs » est employée au niveau académique ou industriel mais ne se rencontre pas dans les textes réglementaires ou législatifs.

Le suivi réglementaire français (dérivé de l'europpéen) **de la pollution de l'air ambiant** consiste en 800 stations de mesures fixes. C'est-à-dire une station pour 687 km² (donc une par carré de 26x26 km), un peu plus dense pour les grosses agglomérations (exemple Paris et son agglomération : 70 stations, une par carré de 21x21 km).

On parle donc d'analyse globale ou moyenne de la pollution. Analyse qui ne reflète certainement pas les micropollutions à l'échelle de la centaine de mètres, voire de la dizaine de mètres quand il s'agit d'épandage de pesticides ou de fumées émanant d'industries, d'incinérateurs.

La variabilité spatiale et temporelle de la pollution est, dans la pratique, aujourd'hui inaccessible.

Une approche à l'aide de modélisations/simulations, dans lesquelles on injecte à la fois des données issues de mesures, des données fournies par les exploitants ou les constructeurs automobiles, et des données météorologiques, permet d'avoir une idée des nuages de pollution à l'échelle d'une ville par exemple et leur évolution dans les jours suivants.

Dans le cadre des ICPE, installations classées pour la protection de l'environnement, ce qui concerne la majorité des sites de production, au sens large, les niveaux de pollutions limites en sortie de processus sont fixés par arrêtés préfectoraux.

Les mesures obligatoires réalisées par les industriels dans le cadre de la réglementation des ICPE alimentent des logiciels de simulation pour fournir des cartographies de pollution en fonction des conditions météorologiques (données gérées par le Citepa).

La pollution globale, mesurée à bonne distance des sources de pollution, est la somme des 4 types de pollutions : industrielles, agricoles, due aux transports, résidentielle.

Des analyses beaucoup plus nombreuses sur le territoire, à l'aide de réseaux de capteurs dont la répartition se ferait en fonction du nombre et de la nature des sources d'émissions, auraient le mérite de pouvoir attribuer de manière fiable et sans ambiguïté, les contributions respectives à la pollution globale et locale.

Les actions à initier seraient alors plus ciblées et d'une efficacité apte à réduire plus rapidement les pollutions. La réactivité lors d'incident ou d'accidents serait fortement augmentée avec tous les bénéfices sur les populations qui en découleraient.

Le concept de pollueur payeur prendrait tout son sens et son application simplifiée.

La densification du maillage de capteurs environnementaux dépend aussi de la possibilité des capteurs à détecter les molécules considérées comme polluantes.

La multiplicité et la complexité variable des molécules dites « polluantes » et de leurs outils d'analyse (exemple : CO₂ versus une molécule organique d'un pesticide) rend le suivi détaillé de la pollution difficile voire impossible avec un maillage au niveau du citoyen. D'autant plus que la complexité de nombreuses analyses (métaux, HAP, COV) nécessite des prélèvements de gaz suivis d'analyses de laboratoire à l'aide d'appareils très sophistiqués (exemples : chromatographes en phase gazeuse suivi d'un spectromètre de masse >100 K euros). Il est donc quasi impossible, pour des raisons budgétaires, de multiplier à l'envie, ces sites de mesures et ces analyses.

Les analyses par microcapteurs permettent aujourd'hui de mesurer des sous-produits de pollution (taux de particules, CO₂, CO, NO_x, O₃etc) sans permettre la quantification d'espèce plus dangereuses (HAP, BTEX, pesticides, etc.).

L'attrait des microcapteurs « bas cout » ne doit pas faire oublier la nécessaire fiabilité ni l'aspect tout relatif de « bas » dans « bas cout » notion souvent mise en avant par les industriels comme argument marketing. On constate que « bas cout » peut varier de 500 à 20 000 euros.

4 La surveillance environnementale actuelle

4.1 La surveillance environnementale vue du côté des industriels :

Surveillance obligatoire

Les industriels sont tenus à une surveillance environnementale de leurs installations. Cette surveillance est définie dans des arrêtés préfectoraux qui s'inspirent des BREFs, documents de référence des meilleures techniques disponibles, élaborées au niveau européen.

Dans le cadre des ICPE (installations classées pour l'environnement), ce qui concerne la majorité des sites de production, au sens large, les niveaux de pollutions limites en sortie de processus sont fixés par arrêtés préfectoraux qui peuvent comporter des plans d'analyses régulières des pollutions.

L'état intervient ultérieurement dans le cadre des pollutions accidentelles (DGPR) et non sur la pollution chronique (dite de fond).

Les BREF sont régulièrement revues et adaptées aux évolutions technologiques.

Les contrôles sont définis selon des normes, spécifiques à chaque type d'industrie.

Surveillance facultative

Dans le cas où les industriels n'ont pas d'obligation, par exemple le suivi de certaines molécules, ils peuvent néanmoins assurer un suivi pour mieux répondre aux attentes sociétales, ou éviter des litiges avec des associations de riverains.

4.2 Surveillance environnementale dans le cadre urbain

Le suivi réglementaire français (dérivé de l'europpéen) de la pollution de l'air est à l'origine du réseau d'environ 800 stations de mesures fixes, constitué par les AAQSQA (association agréée de surveillance de la qualité de l'air), Airparif, est le plus connu.

On parle d'analyse globale ou moyenne de la pollution. Analyse qui ne reflète pas les micropollutions à l'échelle de la centaine de mètres, voire de la dizaine de mètres quand il s'agit d'épandage de pesticides ou de fumées émanant d'industries, d'incinérateurs.

La variabilité spatiale et temporelle, détaillée à l'échelle de l'individu, de la pollution est, dans la pratique, aujourd'hui inaccessible.

Une approche à l'aide de modélisations/simulations, dans lesquelles on injecte à la fois des données issues de mesures, des données fournies par les exploitants ou les constructeurs automobiles, et des données météorologiques, permet d'avoir une idée des nuages de pollution à l'échelle d'une ville par exemple et leur évolution dans les jours suivants.

La législation ne préconise pas la détection des sources de pollution dès lors que la population n'est pas mise en danger imminent.

Dans le domaine de l'eau, les zones urbaines cumulent 3 contraintes : gestion de l'eau potable, des eaux d'assainissement et des eaux pluviales. Les autres eaux (lacs rivières mer océan) seront mentionnées puisqu'elles interagissent avec les eaux urbaines et industrielles.

Chacun de ces 3 domaines nécessite des analyses spécifiques.

4.3 La surveillance environnementale vue du côté état (enjeu sociétal) :

Enjeux environnementaux :

L'état veille à l'équilibre entre nécessité économique, santé des individus et santé de la planète. La surveillance environnementale est un moyen de contrôler que les dispositions, lois, décrets, arrêtés sont respectés.

Les enjeux peuvent être regroupés dans les thèmes suivant :

- prévenir et gérer les crises (pollutions accidentelles)
- Garantir les enjeux long terme de l'environnement (pollution, réchauffement, biodiversité)
- Comprendre les mécanismes liés aux pollutions (ex : la pollution et son influence sur la santé)
- Informer les populations

Les responsabilités de la surveillance environnementale sont diversement réparties en fonction de :

- Territorialité des pollutions (génération, localisation, diffusion), micro et macro environnements, transnational ite des pollutions
- Découpage des territoires et responsabilités environnementales partagées (chaque entité territoriale est concernée par l'environnement : l'état, le MTES, les préfetures, les régions, les départements les communautés de communes, les communes)

Le suivi des pollutions s'effectue aussi par typologie :

- Suivi des environnements proches des zones industrielles (pollutions récurrentes ou accidentelles)
- Suivi des environnements urbains et péri urbains
- Suivi des environnements des transports (trains, auto, bateaux, avions)
- Suivi des bâtiments publics et privés recevant du public (écoles, administrations, locaux recevant du public, commerces)
- Suivi des pollutions domestiques d'origines extérieures et pollutions intérieures (matériaux de construction ou d'ameublement dégazant, chauffage bois etc.) pour établissement de normes des matériaux, de ventilation etc.

4.4 les pollutions/polluants actuellement suivis

Cette description n'a pas vocation à être exhaustive. Elle permet le lien entre les paramètres et polluants régulièrement suivis et la possibilité de les suivre via la mise en place d'un réseau de capteurs.

Paramètres de suivi de la qualité de l'air et possibilités de les suivre via un réseau

Les polluants qui sont suivis par les AASQA sont aujourd'hui (1/2021) :

Tableau 2 polluants suivis dans l'air (RECORD 2021)

polluant	nom	Possibilité d'insertion dans un réseau
NOx	oxydes d'azote	oui
PM10 et PM2.5	les particules fines en suspension	oui
SO2	dioxyde de soufre	oui
O3	ozone	oui
CO	monoxyde de carbone	oui
COV	composés organiques volatils	Taux COV Global
HAP	hydrocarbures aromatiques polycycliques	
Métaux lourds	plomb Pb, cadmium Cd, arsenic As, nickel Ni	Arsenic

Les pesticides ont fait l'objet d'une « campagne exploratoire nationale de mesure des résidus de pesticides dans l'air », ponctuelle, de 2018 à 2019, pour vérifier la pertinence de leur mesure et de leur périodicité : la présence de nombreux pesticides mais à faible taux n'a pas incité l'ANSES à recommander un suivi particulier.

Paramètres de suivi de la qualité de l'eau et possibilités de les suivre via un réseau

Tableau 3 polluants suivis dans l'eau (RECORD, 2021)

	Eau potable	Assainissement rejets	pluvial	Rivières/lacs/étangs	Possibilité d'insertion dans un réseau
	63 paramètres				
Hauteur		x	x	x	oui
débit	x	x	x	x	oui
fuites	x	x	x		oui
pH/température	x			x	oui
MES				x	
turbidité	x			x	oui
dureté					
Ions (Cl, K, Na etc.)	x				oui
Nitrates, fluor	x				
métaux	x				
HAP	x				
hydrocarbures	x				
DCO		x		x	Par UV
DBO		x		x	
O2 dissous	x			x	oui
polluants				x	
microbiologie	x		x	x	
micro plastiques				x	
flore				x	
Perturbateurs endocriniens	x	x		x	

Paramètres de suivi de la qualité des sols et possibilités de les suivre via un réseau

L'analyse des sols concerne essentiellement les sites pollués par d'anciennes industries. La liste des polluants rencontrés et analysés est assez vaste dont :

Tableau 4 polluants rencontrés dans les sols (RECORD, 2021)

polluants	Possibilité de capteurs autonomes raccordés à un réseau
Hauteur d'eau des nappes phréatiques	oui
métaux lourds	
hydrocarbures	
HAP	
COV	globaux
Huiles minérales	
Goudrons	
Hydrocarbures halogénés volatils	
Organochlorés	
PCB	
PCT(Polychloroterphényles)	
Dioxines	
Furanes	
Phénols	
Chlorophénols	
Cyanures	
arsenic	oui
Pesticides ²³	
Phtalates	
Esters phtaliques	
Substances chimiques à usage militaire	
Explosifs	
Munitions non explosées	
Eutrophisants (nitrates, phosphates)	
Acides, bases	oui
Radionucléides	oui

Les analyses se font généralement en tenant compte de l'historique d'activités du site

Perspectives sur les nouvelles pollutions à suivre

La recherche des polluants est freinée par la non disponibilité de technologies de mesures simples et peu onéreuses. En particulier la recherche des pesticides est particulièrement compliquée du fait de la complexité et la diversité des composés chimiques.

De nouvelles pollutions sont apparues, souvent regroupées sous le terme « micropolluants » comme les perturbateurs endocriniens, issus de l'industrie pharmaceutique et susceptibles d'être présents dans l'eau potable et les terres agricoles du fait de l'épandage des boues des STEPs. De même de nombreux pesticides sont encore difficiles à détecter.

Ces pollutions diverses se mesurent avec des appareils de laboratoires et de procédures d'extraction qui rendent leur analyses coûteuses et consommatrice de temps.

L'espoir de nouveaux capteurs simples, bon marché et sélectifs, par exemple de type MOS avec couche fonctionnalisée sélective, est régulièrement déçu.

Mesure du taux de particules :

La mesure des taux de particules dans l'air fait partie des plus réalisées, très certainement du fait de sa simplicité apparente (diffraction laser), de sa fiabilité et de son très faible coût (le coût de production de la cellule de mesure elle-même ne dépasse pas 30 euros). Il est le reflet d'une pollution ambiante. Mais cette simplicité ne doit pas masquer l'incertitude qui subsiste quant à la nature des particules comptées à l'origine de la pollution. Le récent rapport de l'étude RECORD, « **Particules : lien entre caractérisation physico-chimiques et impact sanitaire** » montre que peu d'études parmi les nombreuses études listées dans la bibliographie étudiaient la composition des particules. Ce qui est considéré comme une lacune par les auteurs.

Il est certain qu'une poussière de sable amenée par le vent du Sahara, une poussière d'argile amenée de la campagne ou des embruns de sels marins auront une nocivité bien différente de celle d'une particule de HAP résultant d'une combustion incomplète d'un moteur à explosion ou d'un insert à bois. Des recherches sur un moyen simple de caractériser/trier les particules sans passer par l'analyse d'un filtre en laboratoire seraient les bienvenues. Le laboratoire le Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace (LPCE2) du CNRS est un bon exemple d'un tel type de recherche. Son dispositif LOAC, disposant de 2 angles de détection de la diffusion de lumière par les particules, permet qu'une approche estimative de la nature des particules. Il permet de surcroît une analyse fine de la taille des particules (entre 200 nm et 30µm en 19 gammes) Des essais sont réalisés dans le métro parisien.

4.5 Les outils actuels de surveillance : Des analyses et analyseurs sophistiqués

Dans les tableaux ci-dessus, mentionnant les polluants à analyser, la grande majorité le sont à l'aide d'appareils sophistiqués et coûteux, réclamant des calibrations, des maintenances périodiques. Ces appareils nécessitent un personnel hautement qualifié et ne permettent pas l'autonomie. Seules quelques stations autonomes de type analyseurs colorimétriques assurent des analyses automatiques de l'eau et transmettent leurs données par liaisons sans fil.

Périodicité des analyses

Du fait de la cherté, de la complexité de la mise en œuvre et du caractère non légal à court terme, la périodicité des analyses est souvent mensuelle voire annuelle. Elles se font en grande partie par prélèvement (échantillonnage) suivi d'une analyse en laboratoire spécialisé. Les analyses en temps réel concernent principalement aujourd'hui le suivi des gaz « simples », les taux de particules, la température et l'humidité, les hauteurs et débits d'eau.

Des microcapteurs et capteurs « bas coûts »

La possibilité de pouvoir utiliser des capteurs mesurant toutes les espèces polluantes, bons marchés, fiables, et fonctionnant de manière autonome sans recalibration et maintenance lourde nécessitant le dépôt et le renvoi à un laboratoire, n'est pas encore au rendez-vous. Sauf pour les mesures physiques simples (température, humidité, débits, hauteurs d'eau)

Des tests sont réalisés de manière annuelle par des organismes indépendants (exemple ATMO France) pour qualifier et comparer les capteurs de différentes marques et technologies. Les résultats des challenges microcapteurs organisés par AIRLAB depuis 2018 ne sont pas très encourageants quant à la fiabilité des solutions, leur coût et la facilité de traitement des données.

Chaque société propose sa propre plateforme de visualisation des données sans qu'il soit possible de basculer et de fusionner plusieurs de ces plateformes en cas d'utilisation de centrales de mesures provenant de marques différentes.

4.6 Enjeux des réseaux de capteurs environnementaux Mieux cerner l'origine, la nature, les niveaux des pollutions

Mieux cerner l'origine des pollutions, pollutions industrielles, agricoles, chauffage domestique ou transports et leur répartition sur le territoire ou dans les locaux, implique un maillage de systèmes d'analyses beaucoup plus important qu'aujourd'hui

Connaître la proportion attribuable à tel ou tel secteur permet de mieux comprendre l'impact des actions pour réduire les pollutions. Cette analyse fine est indissociable d'analyses proches des sources de pollution et leur intensification.

Mais un maillage beaucoup plus dense de capteurs ne peut se faire qu'avec la disponibilité de capteurs bas coût, autonomes, organisés en réseaux sans fil

Les autres intérêts des réseaux de capteurs

Une meilleure connaissance des pollutions a d'autres bénéfices :

- Améliorer la réactivité suite à des pollutions majeures accidentelles : un maillage fin de capteurs permet de visualiser les déplacements des polluants.
- Mieux comprendre le lien entre pollution et santé : diverses pollutions sont suspectées d'être soit des contributeurs aggravant soit des déclencheurs de nombreuses maladies, cancers en particulier.

Enjeux des capteurs :

L'enjeu des réseaux de capteurs environnementaux est d'abord un enjeu capteurs.

Tant que les capteurs et en particulier les microcapteurs n'auront pas gagné en sélectivité, fiabilité, et en espèces chimiques détectables, les réseaux de capteurs auront un intérêt symbolique, proche de la gadgetisation, du même type que les centrales domestiques de mesure de la qualité de l'air mesurant, taux de particules, formaldéhyde, COV, accessibles à moins de 100 euros, sans aucune indication de la précision du niveau de qualité de l'air affiché.

La normalisation et la certification vont jouer un rôle prépondérant dans l'évolution, l'acceptation et l'utilisation des nouvelles technologies de mesure.

Les capteurs électrochimiques pour mesurer les gaz ont rendu bien des services à l'époque où les techniciens pouvaient les changer tous les 3 mois. La miniaturisation n'a pas changé les problèmes de dérive, de saturation destructrice, de courte durée de vie, de sélectivité très moyenne. Ce sont donc de mauvais candidats pour les microcapteurs appelés à être mis en réseau pour des années sans maintenance. Des efforts pour essayer de compenser leur défaut de manière logicielle vont demander beaucoup d'efforts, calibrations en ligne mais avec quelle référence fiable dans le temps ? Et sans garantie de fiabilité de la mesure in fine.

La spectrophotométrie optique UV, visible et IR, la spectroscopie Térhertz, les technologies silicium (MOS, ISFET, MOX), lab on chip, dispositifs à ondes acoustiques de surface, dispositifs SPR (surface plasmon résonance) restent encore de puissants domaines d'innovations dans la mesure et l'analyse moléculaire par des micro ou nano dispositifs intégrables facilement dans des réseaux.

Pour pallier le manque de capteurs temps réel pour des espèces présentes en très faible quantité (ppm ou ppb), des **dispositifs intérateurs/intégratifs (échantillonneurs intégratifs)** sont en développement à la fois dans le domaine de l'eau (détection de micropolluants) et celui de la pollution atmosphérique (la récupération des particules dans des filtres pour analyse en est un).

Ce type de capteurs, non miniaturisé et donc plus cher que de simples microcapteurs issus d'un process de semiconducteurs, pourrait s'intégrer directement dans un réseau sans fil, sans retour au laboratoire, à condition qu'une analyse optique ou résistive, simple, puisse se faire. Ainsi qu'un changement automatique des dispositifs intégratifs. Cela signifie néanmoins une maintenance accrue et plus de risques de pannes de l'équipement

Des solutions d'électrophorèses capillaires ou de micro chromatographie gazeuse, existantes, mériteraient des développements industriels conséquents pour les rendre accessibles en production de masse et réduire leurs coûts.

S'insérer dans la montée en puissance des objets connectés

La montée en puissance des objets connectés (l'internet des objets IoT), grâce aux connectivités WIFI et BLUETOOTH dans un premier temps puis aux réseaux de télécommunications SIGFOX et LORA dans un deuxième temps (après 2010), stimule les développements des réseaux télécommunications sans fil et des capteurs les utilisant pour transmettre leurs données.

Liste d'exemples d'applications qui stimulent le développement des réseaux d'objets connectés :

- Villes connectées : éclairage intelligent, suivi des flottes de véhicules, suivi des places de parking, surveillance des bâtiments publics, suivi du bruit, de la pollution,
- Bâtiments connectés : monitoring des températures humidité des bâtiments (pilotage des ventilations et climatisation), gestion de l'énergie et de la consommation d'eau, sécurité des bâtiments
- industrie 4.0 : suivi du matériel, des produits en fabrication, du process, des personnes, maintenance préventive et prédictive
- Agriculture connectée : mesures au champ (température, degré d'humidité), dans les granges (température des bottes de foin) à l'étable (détection des vèlages, des maladies, du comportement, de l'alimentation), au pâturage (position de l'animal), ruches connectées
- Médecine connectée : traçage de la prise de médicaments par capteurs ingérables, mesure des paramètres des malades, localisation des malades dans les bâtiments
- Vêtements et corps connectés (wearables) : montres connectées, cardiofréquences, lunettes connectées
- L'énorme marché de la localisation des personnes, des animaux, des containers, des biens, des véhicules, des vélos, par GPS ou triangulation de réseau

Les réseaux de capteurs environnementaux peuvent tirer parti des nombreux réseaux mis en place pour assurer la connexion de tous les dispositifs listés précédemment

Obsolescence, extension, saturation des réseaux

La multiplication des objets connectés risque de saturer les réseaux de télécommunications sans fil. En particulier les réseaux utilisant les fréquences libres (réseaux sans abonnement de type LORA, SIGFOX). Le choix des passerelles est alors déterminant : on choisira de préférence des systèmes multicanaux, et une stratégie bi directionnelle avec acquittement (acknowledgment) de la réception du message, qui se fait au détriment de la consommation et donc de l'autonomie des capteurs.

Les réseaux nationaux sur bandes de fréquence privées, gérés par des opérateurs (LTE-M, NB-IOT), présentent plus de garanties vis-à-vis de la saturation et de la sécurité/sûreté des transmissions. Le rajout d'émetteurs relais permet d'assurer une qualité de service (QoS) optimum.

La pérennité des réseaux est aussi plus sûre lorsqu'ils sont gérés par des sociétés de taille très confortables (Orange, Bouygues Télécom, SFR).

Obsolescence programmée des réseaux de télécommunications :

- la 2G est déjà en cours d'arrêt au niveau mondial
- la 3G s'arrêtera en 2022
- la 4G durera au moins encore 10 ans, une transition compatible avec la 5G est à prévoir pour les nouveaux développements
- les réseaux associés de type LTE-M et NB-IOT liés à la 4G suivront très certainement son planning d'obsolescence et basculeront automatiquement vers la 5G (sans modification pour les end-users)
- la 5G sera déployée avec une bonne couverture d'ici 5 ans
- la pérennité du réseau SIGFOX est incertaine, celle de LORA moins risquée puisqu'elle n'est pas liée à un seul opérateur

la gestion des futurs flux de données

Les flux de données générées par les objets connectés le seront essentiellement sur des clouds privés ou publics gérés via des plateformes. En particulier les plateformes fournies par :

- Microsoft : azure : accords avec CISCO ou AVNET
- Google cloud IOT : accord du 10/2/2021 avec SIGFOX
- Amazon : AWS (Amazon web services), déjà utilisé pour ses objets connectés les objets connectés d'AMAZON utiliseront le réseau LORA (accord de septembre 2020 avec semtech) qui permettra une extension du réseau domestique Amazon sidewalk à l'extérieur avec une portée étendue à environ 1km
-

La taille de ces mastodontes est une garantie qu'il n'y aura pas saturation des clouds.

Le développement de plateformes privées peut bénéficier soit des briques de base des 3 plateformes soit de celles développées par des sociétés informatiques qui seront, de facto, moins ouvertes.

Etant donné la multiplicité des solutions logicielles déjà existantes il est peu économique de faire développer de nouvelles plateformes ex nihilo. Des sociétés proposent des personnalisations de plateformes existantes.

Des solutions avec de « gros » partenaires industriels (IBM, CAP GEMINI, ATOS, etc.) sont aussi envisageables, elles seront néanmoins certainement plus coûteuses.

5 Les réseaux de télécommunications

5.1.1 Glossaire « réseaux »

- **Réseau** : terme générique qui signifie « ensemble de dispositifs interconnectés »
- **message** : l'information échangée entre deux systèmes informatiques (les données des capteurs par exemple).
- **paquets** : suites de bits constituant une partie d'un message, (le message peut être découpé en plusieurs paquets).
- **Trame** : c'est l'organisation d'un message pour son envoi.

Tableau 5 trame d'un message fictif :

Adresse du capteur	Code d'émission	Données capteurs	Code de vérification
8 bits	4bits	16 bits	4 bits

- **BUS** : conducteur ou ensemble de conducteurs permettant de véhiculer des signaux électriques
- **routing** : action (effectuée par un routeur) qui permet la réception, l'aiguillage et la redirection des informations circulant sur un réseau (les informations peuvent être « descendantes », venant d'un serveur, ou montantes, allant vers un serveur).
- **concentrateur/coordonateur** : permet de connecter plusieurs dispositifs sur une même entrée d'un ordinateur (hub USB par exemple) par extension, un dispositif recevant les données de plusieurs capteurs pour les renvoyer vers un routeur pour être qualifié de concentrateur ou coordonateur
- **Passerelle** : est le nom générique d'un dispositif permettant de relier deux réseaux informatiques de types différents, par exemple un réseau local et le réseau Internet ou des capteurs et le réseau internet via un modem-routeur internet (live box par exemple) Un modem-routeur peut prendre le nom de passerelle par extension Cependant, le terme passerelle désigne plus couramment le modem-routeur² ou box qui permet de relier un réseau local au réseau Internet. Une passerelle effectue donc le routage des paquets de données mais peut également effectuer des traitements plus évolués sur ceux-ci. Le plus souvent, elle sert également de pare-feu, de proxy, effectuée de la qualité de service, etc.

Un exemple de passerelle « low cost » : [une carte raspberry](#) (environ 40 €)

- **Proxy** : Un proxy est un composant logiciel informatique qui joue le rôle d'intermédiaire en se plaçant entre deux hôtes pour faciliter ou surveiller leurs échanges. Dans un réseau informatique, un proxy est un programme servant d'intermédiaire pour accéder à un autre réseau, généralement Internet. Par extension, on appelle aussi « proxy » un matériel comme un serveur mis en place pour assurer le fonctionnement de tels services (fourni en général par le FAI (fournisseur d'accès à internet). Dans le modèle [OSI](#), le proxy se situe au niveau de la couche application (la n°7, HTTP, FTP, SSH, etc.).
- **Pare-feu** (firewall) est un logiciel et/ou un matériel assurant la sécurité du réseau, c'est-à-dire le respect des types de communications autorisés sur ce réseau informatique. Il surveille et contrôle les applications et les flux de données
- **Latence** : délai d'attente entre la demande de données et leur réception (suivants les réseaux peut varier de quelques millisecondes (5G) à quelques secondes (NB-IoT)
- **Message d'acquiescement** (acknowledgment) : message renvoyé par le récepteur qui confirme la bonne réception du message

5.2 Préambule

Les scénarios suivants de réseaux de capteurs environnementaux sont proposés à partir des réseaux de transmission LORA, SIGFOX, ou GSM (2, 3, 4 ou 5G, LTE-M ou NB IoT), seuls réseaux généralistes suffisamment déployés en France et en Europe. Le WIFI et Bluetooth peuvent aussi être utilisés lorsqu'un accès à internet est disponible à très courte distance.

Les réseaux satellitaires KINEIS ou ELO (Eutelsat) sont proposés comme alternative lorsqu'aucun autre réseau terrestre n'est disponible.

Des solutions combinant ces réseaux permettent de répondre à des impératifs de couverture et de coûts mais augmentent le développement et la mise en œuvre des réseaux de capteurs.

Dans tous les cas de figures, il convient, avant toute opération, de dresser l'état de réception des réseaux sur le site que l'on veut instrumenter. Le choix d'un réseau dépendra en premier lieu de ce test.

Il existe des testeurs pour les réseaux LORA, SIGFOX, 2G 3G 4G (entre 150 et 1000 €). Un simple smartphone permet de tester les réseaux WIFI et BLUETOOTH.

5.3 Principe d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteurs est constitué d'un ensemble de capteurs reliés à une banque de données par l'intermédiaire de réseaux de télécommunications, de plus en plus de type sans fil, suivi de dispositifs et logiciels de traitement de données, principalement internet et des plateformes. Des passerelles relais maillent un territoire pour faire transiter les signaux de plusieurs capteurs vers internet. Le dimensionnement des mailles dépend de la portée des signaux émis par les capteurs.

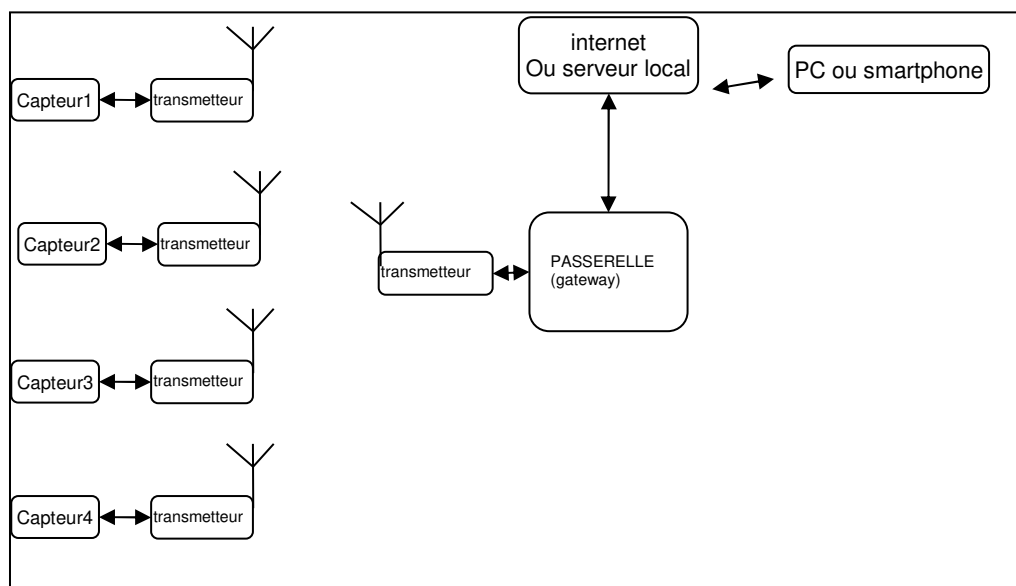


Figure 1 : schéma de principe d'un réseau de capteurs sans fil (RECORD 2021)

5.4 Protocoles

Le vocable « protocole » désigne aussi bien des logiciels que des couches logicielles, c'est-à-dire des logiciels permettant à différents systèmes électroniques/informatiques de communiquer entre eux.

Le nombre de couches logicielles formant un système complet peut aller jusqu'à 7. Les protocoles gérant l'internet en contiennent 4.

Les protocoles gérant les réseaux de capteurs, peuvent être une combinaison subtile de couches logicielles puisque plusieurs éléments constituent un réseau de capteurs :

- Le capteur lui-même qui transforme une grandeur physique en une grandeur électrique (analogique ou digitale)
- Le microprocesseur/microcontrôleur qui pilote les capteurs
- L'émetteur inclus ou non dans le microprocesseur/microcontrôleur
- La passerelle qui reçoit les informations du capteur et son identification
- Le routeur qui envoie les données vers internet
- Internet qui stocke les données et les restitue via des applications sur smartphone ou PC

Chacun des éléments du réseau de capteurs est programmé à l'aide d'un logiciel différent. Ce qui explique la complexité de tels réseaux de capteurs.

Il existe des plateformes de développement pour chacune des couches logicielles rendant la tâche de développement plus aisée pour les développeurs.

Le développement d'un réseau de capteurs nécessite des multi-environnements de développements et donc des bureaux d'études multi-compétences.

Le problème majeur en informatique est la multiplicité des protocoles propres à chaque constructeur de système ou sous système rendant difficile les interconnexions entre dispositifs de marques différentes.

Pour tenter de remédier à ce Babel de l'informatique, des architectures « standards » ont été définies sous forme de normes par des structures internationales pour permettre l'interfaçage ou l'interchangeabilité entre les cartes et systèmes électroniques.

Dans le domaine des cartes/systèmes électroniques les modèles OSI et TCP/IP sont les plus répandus.

Analogie avec le monde physique : métaphore du colis postal

Le transfert de données d'un point à un autre se passe comme celui d'un colis ou d'une lettre acheminée par un transporteur :

On devra définir

- l'expéditeur
- l'adresse d'expédition et le récipiendaire,
- le transporteur
- le délai d'acheminement (plus ou moins rapide, prioritaire ou non)
- le moyen d'acheminement (air ou terre)
- une assurance ou non
- une qualité d'acheminement
- l'information de bonne réception (recommandé accusé avec réception)
- la possibilité de retour si le colis n'a pas été livré et la raison du retour
- le contrôle de la qualité de réception (colis endommagé ou non)
- le coût du transport

Ces concepts ont tous leur équivalent en informatique. auxquels s'ajoutent les étapes du circuit d'acheminement transparentes/invisibles pour l'expéditeur :

- les adresses temporaires des zones de transit (les multiples codes barres sur les colis),
- les multiples sous-traitants prenant en charge les colis
- les plateformes de transfert (les hubs)

Pour sécuriser un envoi, il est parfois nécessaire d'envoyer plusieurs colis pour être sûr qu'au moins un arrivera à destination ou diviser le colis en plusieurs sous-colis et le reconstituer à l'arrivée.

En informatique, les colis sont, par exemple, des « paquets », les adresses des expéditeurs sont des adresses IP, la structuration des adresses (nom, rue, ville etc.) des trames, les adresses des zones de stockage des MAC (media access control), les accusés de réception des « acknowledgment », etc.

Chaque fois que vous discuterez avec un informaticien vous lui demanderez de transcrire ses termes « barbares » ou « anglicisés » en termes de logistique transport. Vous y gagnerez en rapidité de compréhension.

Modèles de Couches logicielles

Les couches logicielles permettent l'interconnexion entre les ordinateurs (au sens large chaque système « intelligent » qui contient un microprocesseur ou microcontrôleur)

Le modèle OSI

Le modèle OSI (Open Systems Interconnexion) a défini 7 couches logicielles, indépendamment de la structure interne et de la technologie (des puces). Il a été défini par une norme ISO 7498 (version initiale en 1978). Il ne constitue pas un protocole mais crée un cadre permettant d'en définir.

Chacune des couches rend un ensemble de services spécifiques à la couche supérieure au travers d'interfaces appelées "Services Accès Point" (SAP).

Figure 2 diagramme OSI

	Couche		Fonction	
Couches hautes (ex : relais GSM/ordinateur/ smartphone/ Datacenter/cloud serveurs)	Donnée (data)	7	Application	Point d'accès aux services réseau
		6	Présentation	Gère le chiffrement et le déchiffrement des données, convertit les données machine en données exploitables par n'importe quelle autre machine (ASCII, Unicode, MIME etc.)
		5	Session	Communication Inter host, gère les sessions entre les différentes applications
	Segment/ Datagramme	4	Transport	Connexion de bout en bout, connectabilité et contrôle de flux ; notion de port (TCP et UDP)
Couches matérielles, dites basses (exemple les capteurs)	Paquets	3	Réseau	Détermine le parcours des données et l'adressage logique (adresse IP, IPv4 ou IPv6 etc.)
	Trames	2	Liaison	Adressage physique (adresse MAC) (Ethernet ,token ring, wifi, bluetooth, zigbee, IrDA etc)
	Bits	1	Physique	Transmission des signaux sous forme numérique ou analogique (électronique, radio, laser)

Le protocole (modèle) TCP/IP

TCP/IP désigne une architecture réseau, mais cet acronyme désigne en fait 2 protocoles étroitement liés :

- **TCP (Transmission Control Protocol)** un protocole de transport, qu'on utilise « par-dessus » un protocole réseau,
- **le protocole internet IP (Internet Protocol).**

Ce qu'on entend par « modèle TCP/IP », c'est une architecture réseau en 4 couches dans laquelle les protocoles TCP et IP jouent un rôle prédominant, car ils en constituent l'implémentation la plus courante. Par abus de langage, TCP/IP peut donc désigner deux choses : le modèle TCP/IP et la suite de deux protocoles TCP et IP.

Le modèle TCP/IP s'est progressivement imposé comme modèle de référence en remplacement du modèle OSI.

L'origine du modèle TCP/IP remonte au réseau ARPANET. (Réseau de télécommunication conçu par l'ARPA l'agence de recherche du ministère américain de la défense. Outre la possibilité de connecter des réseaux hétérogènes, ce réseau devait être moins vulnérable que le réseau téléphonique habituellement utilisé pour les télécommunications. Il a alors été convenu qu'ARPANET utiliserait la **technologie de commutation par paquet.**

Les protocoles TCP et IP furent inventés en 1974.

Ce n'est pas une norme mais un standard.

Les avantages du TCP/IP par rapport à OSI

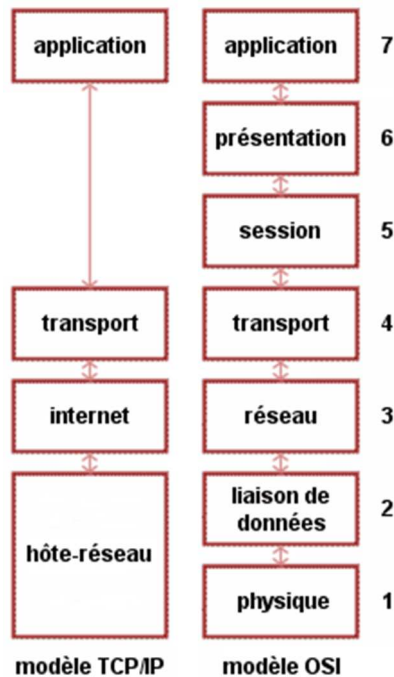
- Les constructeurs fournissent TCP/IP en version de base de beaucoup de systèmes **UNIX** (BSD en particulier La Berkeley Software Distribution est un système d'exploitation dérivé d'Unix et originaire de l'université de Californie à Berkeley.).
- - Des solutions d'interconnexion (LAN-WAN des réseaux sans fil IoT) ont été normalisées entre les protocoles TCP/IP et X25
- -Beaucoup d'applications et de produits n'utilisent que TCP-UDP/IP comme protocole de communication et en font ainsi un standard.
- TCP/IP sur Ethernet est la solution réseau local la plus employée actuellement.

Inconvénient du TCP/IP

- Le protocole IP n'est pas sécurisé (perte de données possible puisqu'il n'y a pas d'accusé de réception des données)

Comparaison simplifiée (graphique) OSI et TCP/IP

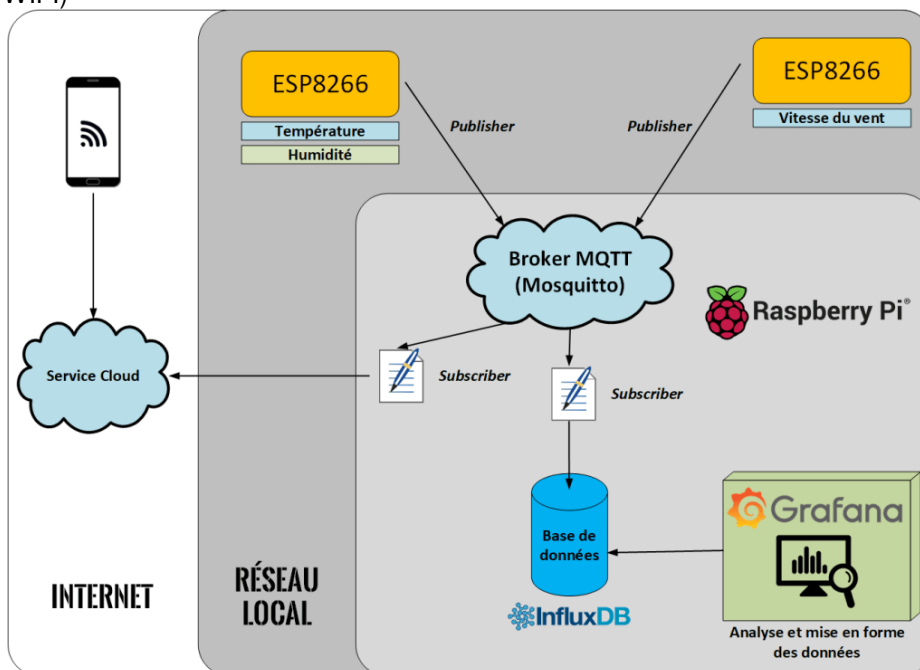
Tableau 6 comparaison modèle OSI vs TCP/IP



Les protocoles spécifiques pour l'internet des objets :

MQTT

C'est un protocole pour le dialogue M2M (machine vers machine) qui utilise le protocole TCP/IP. Il permet la programmation de carte « simples » de type raspberry pour réaliser un réseau de capteurs (dans le schéma ci-dessous, les capteurs utilisent un microprocesseur ESP8266 avec transmission WIFI).



REST

Protocole concurrent de MQTT

CoAP

Constrained Application Protocol

C'est l'équivalent du protocole http pour l'IoT. Il est utile pour les échanges avec les capteurs.

Langages informatiques/plateformes de développement :

Les programmes informatiques sont réalisés à l'aide de langage plus ou moins faciles à utiliser
Les plus courants actuellement sont :

- **C, C++ (C plus plus), C# (C sharp), Java, JavaScript, PHP, Python, HTML**
(développement de sites internet)

On parle d'environnement logiciels (operating systems ou OS) graphiques) sur lesquels sont développées les applications

Les OS Les plus courants :

- **GNU/Linux**(open source donc gratuit)
- **Windows (Microsoft)**
- **iOS** (Apple)
- **Android** (Google et open handset alliance)

Pour programmer les puces utilisées dans les réseaux les fabricants mettent à disposition des plateformes de programmation, par exemple

- Texas Instrument : code composer
- STMicroélectronics : ARM mbed™ IoT Device Platform
- Silicon labs : Gecko OS

La réalisation complète d'un réseau sans fil de capteurs implique la maîtrise de tous les niveaux de programmation, ce qui peut être le fait d'une seule personne (rare) ou d'un petit bureau d'étude de quelques personnes.

Le développement logiciel est, de loin, le poste le plus onéreux dans la réalisation d'un réseau de capteurs.

5.5 La sécurité des réseaux

Quelques évidences qu'il faut malgré tout avoir en tête lors du choix d'un système :

- Le niveau de sécurité des réseaux informatiques doit être traité en fonction de l'importance que l'on accorde aux données que l'on traite et au niveau du risque encourut.
- plus un système est ouvert, plus sa sécurité est fragile, les virus internet sont de bons exemples de défauts de sécurité du WEB.
- Les réseaux sans fil, du fait des transmissions à travers le domaine public (l'espace) sont plus vulnérables que des systèmes filaires (câbles électriques ou fibres optiques)

Les réseaux « privés » sur internet : des mesures de sécurisation supplémentaires peuvent être mise en place pour augmenter le niveau de sécurité des réseaux empruntant les voies de transmission publiques du WEB

- Exemple : le protocole VPN (Virtual private network) permet de bénéficier d'une liaison quasiment privée sur le WEB.

Les réseaux GSM (utilisant des cartes SIM et fonctionnant dans des fréquences sous licence), NB-IOT LTE-M, sont réputés bénéficier d'une plus grande sécurité que les réseaux sur fréquences libres ISM (WIZE, LORA, SIGFOX)

Codage/cryptage des données

Le principe du codage (encryptage ou chiffrement) des données repose sur l'utilisation de clés (key) que le récepteur et l'émetteur partagent pour coder au niveau de l'émetteur) et décoder au niveau du récepteur)

Le plus utilisé, sécurisé et connu est l'AES (Advanced Encryption Standard) qui traite à chaque fois des paquets de 128 bits (16 octets). Il utilise des clés de 128,192 ou 256 bits.

Le chiffrement AES est dit symétrique car il utilise la même clé pour chiffrer et déchiffrer

La communication de la même clé à l'émetteur et au récepteur se fait grâce à un algorithme asymétrique, qui diminue les risques d'interception. Cette gestion de clé de chiffrement est un paramètre déterminant dans le niveau de sécurité.

Certains fabricants de circuits électriques proposent d'augmenter la sécurité en rajoutant des clés supplémentaires sur les circuits de manière à ce que l'émetteur et le récepteur disposent de mêmes clés non transmises.

Les réseaux WI-FI sont sécurisés entre autres par le protocole WPA-PSK (wifi protected acces et pre shared key) dans lequel l'utilisateur (ou le configurateur du réseau) définit au préalable une clé de 8 caractères ou plus.

Les fabricants de puce pour réseaux sans fil intègrent généralement un chiffrement AES128, ce qui sécurise les premiers niveaux d'échange de données dans les réseaux IoT. La sécurité d'un réseau implique la sécurisation de chacune de ses mailles (sécurité de bout en bout), ce qui signifie une complexité d'autant plus grande que le réseau comprend d'éléments. Les réseaux sous licence, plus chers, bénéficient d'une meilleure sécurité que les réseaux ouverts.

5.6 Qualité de services (QoS, quality of service)

Comme son nom l'indique c'est un paramètre servant à qualifier la qualité d'un réseau c'est-à-dire sa facilité à acheminer toutes les données.

La qualité de service dépend de beaucoup de paramètres

- Sensibilité aux interférences
- L'encombrement des réseaux
- Le sous dimensionnement (une seule passerelle pour de trop nombreux capteurs)
- Possibilité de recevoir un accusé de réception (acknowledgment) pour garantir la bonne réception des données (mais consomme plus d'énergie)
- Informatique sans « plantage », (par exemple : préférer des systèmes sous linux ou Unix plutôt que Microsoft)
- La robustesse des logiciels utilisés à chaque niveau

Les réseaux utilisant des fréquences sous licence (les réseaux avec cartes SIM) sont réputés avoir un meilleur QoS, mais sont plus chers. Les fréquences sous licence sont plus contrôlées que les fréquences libres dont la règle du d'occupation maximum peut facilement être transgressée amenant des interférences.

Le choix dépendra des conséquences de la perte de données et de la valeur que l'on accorde aux données.

5.7 Maintenabilité/obsolescence/pérennité/évolutivité/saturation

Maintenance : comme tout produit, un réseau de capteurs est sujet à maintenance, il faut vérifier

L'obsolescence de ses éléments constitutifs : la disponibilité de certains éléments d'un réseau peut faire défaut au bout de quelque temps (c'est aussi valable pour les logiciels)

Pérennité : lorsqu'un maillon d'un réseau dépend d'une seule société, la pérennité de cette société doit être évaluée avec lucidité (exemple SIGFOX)

Évolutivité : La possibilité d'une évolution grâce à de nouvelles technologies apparaissant au fil des années doit aussi être prise en compte dans la décision d'investissement d'une configuration

- exemple : un réseau sous dimensionné en débit ne sera pas capable d'accepter de nouveaux capteurs ou des capteurs plus performants envoyant plus de données.

Saturation des réseaux : c'est un élément à étudier lors du choix d'un réseau mais il n'est pas toujours facile de l'anticiper ni d'évaluer ses conséquences en terme de qualité de service (QoS)

- exemple : la bande des 2.4 GHz utilisée par la WIFI qui peut transiter beaucoup de données est susceptible de perturber un réseau zigbee basé sur la même bande de fréquence

5.8 Interfaçage des capteurs (environnementaux)

Un capteur mesure une grandeur physique ou physico chimique et la transcrit en grandeur électrique, courant ou tension puis un circuit électronique transforme ce signal en un signal, analogique ou digital apte à être interfacé à un équipement. automates programmables, PC ou afficheurs.

Un protocole de communication est inclus dans les capteurs délivrant des signaux numériques (digitaux) : USB, RS232, CAN etc.

De plus en plus de capteurs environnementaux sont maintenant munis d'un circuit électronique d'interface pour communiquer sur les réseaux sans fils (capteurs IOT), ils ne sont malheureusement pas en accès libre mais en général liés à un réseau verrouillé par le fabricant qui propose un traitement des données propre à ses capteurs.

La provenance de capteurs de fabricants différents rend difficile l'intégration des données dans une même base de données.

Une standardisation des protocoles d'échanges de données des capteurs n'est pas à attendre dans un futur proche. C'est pourquoi le développement de plateformes de traitement de données universelles est l'unique solution pour s'adapter aux différents protocoles et réseaux de capteurs. D'où leur prolifération.

Les capteurs utilisant les réseaux GSM, munis de carte SIM, réclament une gestion des abonnements qui justifie l'utilisation de plateformes « device management » (gestion des modules) en amont du traitement des données (« data management »), une gestion supplémentaire dont ne souffrent pas les réseaux de fréquence libre LPWAN de type LORA, SIGFOX (ou propriétaire) ou seule l'identification du module émetteur (MAC) est nécessaire.

Les divers interfaces capteurs :

Les interfaces sont les liaisons à la fois physiques et logicielles qui permettent aux capteurs de communiquer les grandeurs électriques (digitales ou analogiques) au microprocesseur. Les tensions de sorties des capteurs doivent être compatibles avec les tensions d'entrées des microprocesseurs, en général les tensions des nouveaux circuits sont de l'ordre de 0 à 5V ou 0 à 3.3V.

Interfaces analogiques (variation continue proportionnelle à la grandeur mesurée)

- **Courant 4-20 mA** : un convertisseur courant tension suivi d'un convertisseur analogique digital transforme le courant en signal digital dans l'équipement
- **Tension analogique** (exemple 0-5V ou 0 12 V) : un circuit ADC (Analog digital convertor ou convertisseur analogique digital) transforme le signal analogique en signal digital dans l'équipement

Interfaces digitaux

- Les bus filaires industriels (pour connexion sur des réseaux filaires) : **RS232, CAN, MODBUS, IO-LINK, INTERBUS** etc. , quasiment chaque « gros » fabricant a défini son propre bus de données pour «fidéliser» ses clients
- **USB** : autre bus filaire essentiellement destiné à l'interfaçage avec les ordinateurs
- Les bus sur circuits imprimés (ne sortent pas des capteurs mais servent de lien entre le capteur et le microprocesseur interne au capteur) : **I2C, SPI, UART** sont les 3 protocoles majeurs de communication microprocesseur

Intégration de la fonction réseau dans les capteurs ou modules capteurs :

- La carte électronique recevant les signaux des capteurs est aussi munie d'un circuit émetteur/récepteur (transmetteur ou transceiver) qui va assurer l'envoi des données sur le ou les réseaux considérés. Le transceiver est parfois intégré au circuit intégré microprocesseur, l'ensemble s'appelle alors un SOC (system on chip) dont le coût est moindre et la programmation plus aisée. Le fabricant y intègre souvent le protocole des réseaux ou fournit les codes de du protocole visé. Les SOC sont en général multiprotocoles.
- Le coût de la fonction émission dans la carte électronique « capteur » est de 1 à 3 euros (coût de la puce transceiver)
- L'interfaçage d'un capteur dans un réseau sans fil est maintenant classique et ne présente pas de difficulté particulière. Les circuits électroniques spécifiques (SOC) sont disponibles chez plusieurs fabricants.
- L'existence de SOC plutôt que des modules à composants séparés signifie que les protocoles réseaux ont atteint une certaine maturité. C'est un élément à prendre en compte dans le choix d'une solution.

5.9 L'autonomie énergétique des capteurs d'un réseau

Dans les réseaux sans fil un problème majeur des capteurs est leur possible absence de source pérenne d'alimentation, surtout s'ils sont éloignés d'habitations.

L'autonomie dépend de la consommation des capteurs, de leur volume (plus grande batterie intégrable), du nombre et de la fréquence de remontées des informations,

Les capteurs peuvent être mis dans différents états pour diminuer leur consommation :

- -mode actif : le capteur est opérationnel (consommation de plusieurs mW)
- mode veille : le capteur attend un signal du réseau pour se réveiller (consommation du récepteur)
- mode sommeil profond : réveil automatique du capteur à intervalle fixe, entre 2 réveils la consommation est très basse (ordre du nA possible)

Le choix du type de réseau dépend souvent de cet aspect autonomie

- Les réseaux utilisant le réseau GSM (2G, 3G, 4G, 5G) ont une faible autonomie sous batterie (quelques mois) du fait de leur forte puissance d'émission nécessaire et le mode actif permanent, il faut prévoir des sources de réalimentation (ex : panneaux solaires)
 - Les nouveaux réseaux IoT utilisant le réseau GSM, le LTE-M et NB IoT sont prévus pour être de faible consommation, les capteurs pouvant être mis en mode PSM (power saving mode, mode d'économie d'énergie), se réveillant de manière programmée
- Si le besoin d'autonomie est de quelques années sans possibilité de réalimentation il faut se tourner vers les réseaux de type LPWAN (LORA, SIGFOX, propriétaire, ZIGBEE, WM-BUS, WIZE etc.)

5.10 Les sources d'énergie possibles pour les capteurs autonomes

Les batteries non rechargeables

- les batteries au lithium ion permettent une autonomie de plusieurs années avec des capteurs basés sur les puces à consommation ultra basse, désormais courantes chez les fabricants de circuits intégrés (tous les formats existent, de la pile bouton miniature d'une capacité de 30mAh à la pile de 100x70x70mm de plus de 30 000 mAh)

Les sources d'énergie avec stockage sur batterie rechargeables ou supercondensateurs :

- **solaire**
 - panneaux solaires photovoltaïques un panneau de 10cmx10cm suffit à assurer quelques émissions GMS de 2 secondes par jour **c'est la technologie la plus simple et la plus fiable qu'il faut dimensionner en fonction de la région A privilégié pour tous les modules capteurs en extérieur**
- **éolien**
 - petites éoliennes : encombrantes, visibles, pièces en mouvement donc maintenance
- **hydrolien**
 - énergie tirée d'un liquide en mouvement faisant tourner une hélice liée à une génératrice, très sensible à des défauts d'étanchéité, solution très anecdotique
- **thermoélectricité**
 - récupération de la différence de température entre 2 sources grâce à l'effet Seebeck, inverse de l'effet Peltier utilisé dans les modules du même nom, bien connu pour leur utilisation comme régulateur thermiques (BMW utilise la thermoélectricité pour récupérer de l'électricité au niveau des pots d'échappement) le rendement n'est pas bon (15% du rendement de Carnot qui est $1 - T_f/T_c$ ou T_f = température de la source froide et T_c = température de la source chaude en kelvin)
 - à utiliser lorsque 2 sources à des températures différentes existantes (air/eau)
- **électromagnétique**
 - récupération de l'énergie des ondes électromagnétiques environnantes : une antenne et une diode redresseuse suivie d'un régulateur de tension suffisent pour charger un condensateur. Il faut se trouver dans un environnement « chargé » en ondes électromagnétiques pour espérer recharger ses batteries : solution anecdotique
 - principe utilisé dans les transpondeurs passifs (comme dans les cartes à puces sans contact) portée très courte
 - on pourrait utiliser un faisceau micro-ondes (directionnel) pour envoyer de l'énergie à distance mais cela peut poser des problèmes de sécurité (systèmes et santé)
- **électromécanique**
 - on utilise le mouvement d'un aimant proche d'une bobine, qui génère un courant. L'aimant est fixé sur une pièce mobile (par exemple agitée par le vent ou les bruits), c'est le principe de certains microphones, ou hauts parleurs Bonne alternative à l'éolien tournant
 - **vibratoire** : on utilise les vibrations de fréquences acoustiques ou ultrasonores dans la matière. Les déplacements étant plus faible on peut utiliser la piézoélectricité (ex : au bord de routes) ou la triboélectricité :
 - **dispositifs piézoélectriques**
 - céramique sur laquelle une masse appuie (microphones à membrane plate)
 - plastique : un polymère élastique piézoélectrique, le PVDF (Polyfluorure de vinylidène) qui génère de l'électricité quand on le déforme
 - **triboélectricité** : le frottement de 2 isolants engendre de l'énergie électrostatique qui peut être récupérée

- **énergie tirée d'un électrolyte (pile)**
 - un environnement liquide chargé en sels minéraux peut constituer une pile si on y plonge 2 électrodes (eau de mer, vin etc.). La corrosion des électrodes peut être problématique à long terme. L'électrolyte peut être renouvelé naturellement (mer, cours d'eau)
- **bioénergie**
 - énergie produite par des réactions chimiques de bactéries ou levures (piles microbiennes) le problème est l'alimentation en combustible (il faut être dans un milieu liquide qui permet le renouvellement des nutriments)

5.11 Les réseaux de télécommunications adaptés aux capteurs

Nous décrivons les réseaux aptes à gérer des capteurs environnementaux. Vous trouverez en annexe une liste plus complète des réseaux de télécommunications existants et leur domaine d'utilisation.

4 types principaux :

- Les réseaux utilisant les réseaux télécom GSM déployés pour les téléphones portables, avec une couverture nationale et internationale. Ces réseaux sont gérés par des opérateurs de télécom, l'accès nécessite un abonnement leur débit est nettement supérieur à celui nécessaire pour les capteurs. Leur portée peut atteindre plusieurs kilomètres.
- Les réseaux longue distance LPWAN (low power wide area network de type LORA, SIGFOX), de portée plusieurs kilomètres : certains ont une couverture nationale voire internationale (SIGFOX, LORA ...), avec ou sans abonnement. Leur portée peut atteindre 15 km, leur débit est faible mais suffisant pour des capteurs. Leur consommation est très faible et on peut espérer une autonomie de plusieurs années avec une pile.
- Les réseaux satellitaires permettant des liaisons là où aucun réseau terrestre n'est présent
- Les réseaux locaux courte distance LAN (local area network de type wifi, bluetooth), de portée inférieure à 100 mètres, qui sont reliés à internet et donc concurrencent les réseaux longue distance lorsqu'un accès à internet est possible grâce à une box ou un modem 4G. Cette solution est très économique et ne nécessite pas d'abonnement (sauf celui d'un box standard)

Pour constituer un réseau complet on peut mixer les 4 solutions, des exemples de tels réseaux composites sont à découvrir dans les scénarios envisagés ci-dessous

Le tableau suivant liste les paramètres principaux des réseaux de télécommunications sans fil utilisables pour connecter des capteurs.

Tableau 7 : réseaux pouvant constituer des réseaux de capteurs (RECORD 2021)

paramètres	LORA opérateur	LORA privé	SIGFOX	4G LTE-M	NB-IOT	GSM M2M (3G, 4G, 5G)	wifi	Bluetooth	satellite
Portée	1 à 15 km	1 à 15 km	1 à 20 km	1 à 10 km	1 à 10km	0 à 5 km	<50m	<50m	700 km
débit	Entre 12 octets (5 paramètres) toutes les 6.2 s et toutes les 147 s	Entre 12 octets (5 paramètres) toutes les 6.2 s et toutes les 140s	140 msg de 12 octets/jour	1Mb/s	20 kb/s	3G <42 Mb/s 4G < 300 Mb/s	<140 Mb/s	<3 Mb/s	200 bits/s
consommation	++	++	++	--	+	---	--	-	+
Immunité aux interférences	++	++	-	+	+	++	+++	+++	+
Qualité de services	++	+	-	+++	+++	+++	+++	+++	+
mobilité	oui	non	moyenne	oui	moyenne	oui	non	non	oui
localisation	<100m	non	<1km	<100	sans	<1km	<100m	<100m	<150m
sécurité	+	0	-	++	++	++	+	+	
Cout abonnement	12 €/an par module émetteur	0 €	9€/an par module émetteur	15€/an	10 €/an par module émetteur	24€/an par module émetteur	0 €	0 €	50 €/an
Cout module émetteur	5 à 15€	5 à 15 €	10€	60€	60€	50 €	2€	2€	50 €
Cout passerelles	0 € (Si nécessaire 300 à 1000 €)	50 à 1000€	700 € (réémetteur éventuel)	Sans	sans	sans	box	box	sans
modules connectables / passerelle	300 à 1000	300 à 1000	1 000 000	>100 000	>100 000	>100 000	250	7	?
Cout accès plateforme	5 à 25 €/mois	0 €	?	5 à 25€/mois	10 €/mois	5 à 25 €/mois	0 €	0 €	?
couverture	Nationale en surface : 95%	< 10 km ² par passerelle	Nationale en surface :80%	98% de la population	Nationale (en surface) 50%	Entre 70% et 99% (surface)	Dans les bâtiments	Dans les bâtiments	internationale
Pérennité	++	++	--	+++	++	+++	++++	++++	7 ans
opérateurs	Orange, Bouygues télécom, européens et internationaux	aucun	SIGFOX et partenaires (internationaux)	Orange, Bouygues télécom, européens et internationaux	SFR, européens et internationaux	Operateurs internationaux	Aucun	aucun	KINEIS EUTELSAT

Réseau LORA, operateurs LORA (Orange ou Bouygues Telecom en France) :

Le réseau LORA, basé sur le protocole LORAWAN, toutes deux marques déposées de SEMTECH, est un réseau de type LPWAN (low power wide area network) développé depuis 2009 (comme SIGFOX).

Il fonctionne sur les bandes de fréquences libres à 868 MHz en Europe.

La portée maximum est de l'ordre de 15 km en champ libre (sans obstacle)

Le débit maximum d'un réseau sur fréquence libre (LORA ou SIGFOX) est fixé par la règle des 1%, qui est le temps d'occupation maximum de la bande de fréquence en heure glissante, c'est-à-dire 36 secondes par heure

- Pour le réseau LORA, le débit des données dépend du paramètre spreading factor (SF) qui peut prendre la valeur de 1 à 12
- Un SF12 permet d'aller plus loin (15km en champ libre) qu'un SF1 mais le débit est plus faible
- Avec un SF7 la portée est d'environ 3 km mais réduite en cas d'obstacle (bâtiment, végétation, colline) à quelques centaines de mètres mais un débit

Plusieurs réseaux nationaux LORA sont proposés par des opérateurs avec abonnements, mais il existe aussi des réseaux publics à couverture nationale et internationale basés sur des passerelles mises à dispositions gratuitement par des particuliers ou des universités. Ces derniers ne présentent pas un niveau de sécurité et de couverture apte à des projets industriels.

Le réseau LORA a l'avantage d'être proposé aussi comme réseau local privé sans abonnement permettant de ramener des données de centaines de capteurs, repartis sur une surface de plusieurs kilomètres carrés, vers une passerelle (gateway), elle même connectée soit directement à un ordinateur, une livebox par ethernet ou wifi, soit connectée à un réseau opérateur de type GSM (M2M c'est-à-dire échangeant des données grâce à des réseaux 2G, 3G,4G LTE, et bientôt 5G)

Cette solution LORA local est très économique sur le plan matériel

Lorsque le nombre de capteurs installés est faible et si la zone est couverte par un réseau LORA, on peut envoyer directement les données sur le réseau LORA sans utiliser de passerelle.

Réseau SIGFOX, opérateur SIGFOX :

Ce réseau présente l'intérêt de la longue portée (2 à 20 km suivant la configuration du relief et des obstacles) et de la bonne couverture à l'international sans avoir à changer d'opérateur par région.

Le débit maximum du réseau est de 140 messages par jour de 12 octets (équivalent à environ 5 paramètres) c'est-à-dire un message toutes les 10 mn. Il **n'est donc pas adapté aux communications qui nécessitent plus de rapidité dans les échanges**

Un inconvénient majeur réside dans le risque de non pérennité de la société SIGFOX, le business model semble avoir surévalué le marché de l'IOT longue distance et la concurrence de LORA sous-évalué. Une première vague de licenciement intervient fin 2020 (14 % des effectifs)

L'autre facteur de risque est le verrouillage total du circuit des données par la société SIGFOX.

Le NB-IOT :

C'est un réseau basé sur les relais 4G, prêt pour la 5G.

C'est une bonne alternative aux réseaux SIGFOX et LORA, plus sécurisé, qui permet une bonne autonomie. Le temps de latence de quelques secondes n'est pas gênant pour des réseaux de remontée de données capteurs.

Seul SFR business propose ce réseau en France, les 2 autres opérateurs ayant misé sur LORA ou le LTE-M (plus industriel du fait de sa faible latence).

Délai de mise en place du réseau (hors développement/interfaçage des capteurs) : environ 3 mois

Couverture : Très répandu dans l'est de l'Europe. 20 000 antennes 4G couvrent la France en septembre 2020 (en comparaison Orange 23000 et Bouygues 19300) la surface couverte ne représente qu'environ 50% du territoire.

Le LTE-M (Long-Term Evolution for Machines) a été conçu pour l'loT (Internet of Things).

Ce réseau utilise aussi les réseaux 4G existants et fonctionne sur les fréquences basses (en France entre 700 et 800 MHz) et grâce au protocole CAT-M1 qui permet d'améliorer l'accessibilité de tous les objets connectés.

Le LTE-M optimise également la consommation énergétique de ses objets grâce à la mise en veille (Power Saving Mode). C'est aussi une solution sécurisée puisqu'elle utilise l'authentification des cartes SIM. Chaque opérateur utilise une bande de fréquence dédiée.

Les réseaux mobiles LTE sont commercialisés sous l'appellation « 4G » par les opérateurs de nombreux pays,

Il est prévu que LTE-M soit compatible avec la 5G mais il faudra veiller à ce que les dispositifs connectés soient munis de transmetteurs aptes à fonctionner aux fréquences de la 5G, 3.6GHz et supérieur.

GSM M2M :

Réseau de données basé sur les réseaux 2G, 3G et 4G des téléphones mobiles. Des cartes SIM multi opérateurs permettent d'avoir une accessibilité européenne et mondiale.

Ces réseaux sont gourmands en énergie, les capteurs ne pourront pas être autonomes sans une source d'énergie durable (panneaux solaires)

WIFI et BLUETOOTH :

Réseaux de transmission bien connus du public, ils équipent les smartphones et presque tous les équipements électriques. Le WIFI sert principalement à communiquer rapidement avec des box le Bluetooth (et surtout le Bluetooth BLE, pour Bluetooth low energy) sert à la communication entre « petits » dispositifs électroniques de type montres vers les Smartphones.

Ces 2 réseaux sont libres d'accès, de faible portée (quelques dizaines de mètres), d'un débit très largement supérieur au besoin capteur, ils sont suffisants et très économiques pour connecter des capteurs dans des environnements proches de routeur internet (livebox, freebox etc.)

5.12 Les typologies/scénarios réseaux proposés pour 7 configurations de sites

Vous trouverez ci-dessous 7 typologies de réseaux de capteurs qui regroupent tous les cas de figure que l'on peut rencontrer. **Ces scénarios concernent aussi bien la qualité de l'air, de l'eau et des sols.**

La seule différence entre l'air l'eau ou les sols est le fait que la partie émettrice des capteurs pour analyser l'eau ou les sols est placée au niveau du sol (ou du cours d'eau), donc la portée sera plus faible que celle des capteurs d'air se positionnant en hauteur. On se référera au tableau montrant la dépendance de la portée avec la hauteur des antennes.

Pour les domaines de l'eau ou des sols, l'allongement des antennes de quelques mètres ne pose pas de difficulté. Au contraire, le fait de déporter la fonction antenne par un simple câble coaxial (2 €/mètre) peut permettre de dissimuler une antenne (qui est simplement constituée par le câble coaxial dénudé sur une longueur variant entre 3 et 6 cm qui est recouverte d'un plastique protecteur). Donc si vous faites développer des capteurs eau ou sol demandez impérativement des connecteurs pour y raccorder des antennes pouvant atteindre plusieurs mètres.

Scénario 1 : Surveillance qualité de l'air et de l'eau et des sols en France de :

- zone type dépollution de sols en milieu urbain
- dimension 200 m x 200 m
- transmission des données : 5 paramètres à la minute

Scénario 2 : Surveillance qualité de l'air de l'eau et des sols en Europe de :

- Un site pollué
- Ou un site industriel ou urbain mal desservi en internet
- Ou un site d'enfouissement des déchets
- Transmission des données : 5 paramètres par minute

Scénario 3 : Surveillance qualité de l'air de l'eau en Europe de :

- Un site industriel ou abord site industriel ou urbain bien desservi en internet, Surface totale 2x2 km
- Transmission des données : 5 paramètres par minute

Scénario 4 : Surveillance qualité de l'air de l'eau et des sols en Europe de :

- Installation d'enfouissement de déchets
- Transmission des données : 5 paramètres toutes les 15 à 30 mn

Scénario 5 : Surveillance qualité de l'air de l'eau et des sols dans un endroit du globe non couvert par un réseau terrestre :

- Transmission des données : 5 paramètres toutes les 15 à 30 mn

Scénario 6 : Surveillance qualité de l'air par un ensemble de capteurs mobiles (véhicules, vélo, bus) :

- Débit de données non spécifié

Scénario 7 : Surveillance qualité de l'air de l'eau et des sols dans des espaces confinés souterrains :

- (métro, tunnels, mines, rivières et cavités souterraines)

Scénario 1	Surveillance qualité de l'air en France dans : <ul style="list-style-type: none"> zone type dépollution de sols en milieu urbain, dimension 200 m x 200 m transmission des données (5 paramètres) à la minute		
	Réseau proposé	Marques (exemples)	Prix indicatif
réseau	<ul style="list-style-type: none"> LORA local puis operateur M2M (2, 3,4G LTE-M ou NB-IOT) Ou LORA operateur si 1 ou 2 modules suffisent 	<ul style="list-style-type: none"> ORANGE BOUYGUES TÉLECOM SFR (NB IOT) Carte SIM multi operateurs 	Abonnement de 12 € /an par passerelle connectée ou module connecté
passerelle	<ul style="list-style-type: none"> LORA vers GSM (2, 3 ou 4G, LTE-M ou NB IOT) Sans passerelle si solution avec LORA operateur existe 	<ul style="list-style-type: none"> KERLINK MULTITECH DRAGINO Sans passerelle 	<ul style="list-style-type: none"> 615 € 350 € 50 € (1 canal) 0€
capteurs	Munis chacun d'un Module LORA Ou plusieurs capteurs sur un même module (qui peut en accueillir au moins dix)	<ul style="list-style-type: none"> Modules MURATA Puce STmicroélectronics 	<ul style="list-style-type: none"> 12 € / module 5 € /puce
Débit maximum	Réseau local LORA <ul style="list-style-type: none"> En mode moyenne portée SF7 (3km sans obstacles ou 300 avec) : 5 paramètres toutes les 6.2 secondes. Ce qui permet de raccorder 10 modules capteurs Réseau opérateur GSM : pas de limitation de débit ni de nombre de capteurs		
Développement Logiciel	Cout sous traitance : entre 20 000 et 50 000 euros (sans développement des capteurs et leur raccordement à un module LORA) <ul style="list-style-type: none"> Programmation de la passerelle et des modules LORA Personnalisation d'une plateforme cloud publique ou privée 		
Niveau de difficulté	Faible		
Délai de réalisation	Entre 3 et 6 mois		
Autonomie des modules capteurs	Plusieurs années avec pile AA (suivant le nombre d'émissions)		
Autonomie de la passerelle	Panneau solaire nécessaire (40x60 cm)		
remarques	La sécurisation du site peut être nécessaire		

Figure 3 scénario 1 : site pollué en FRANCE sans couverture LORA (Orange ou Bouygues Telecom) ou couverture LORA mais de nombreux modules capteurs (> 10) et sans acces internet (RECORD 2021)

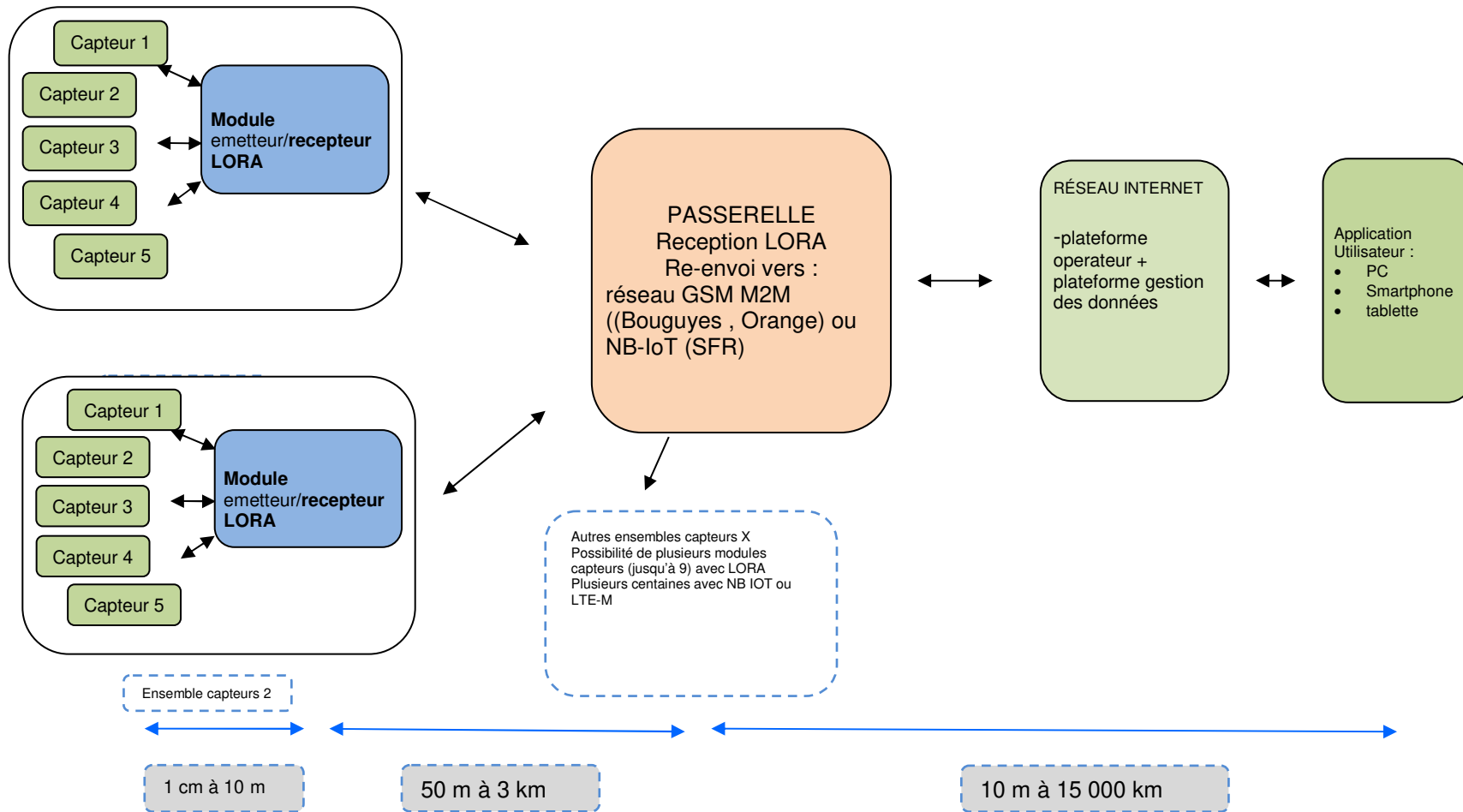
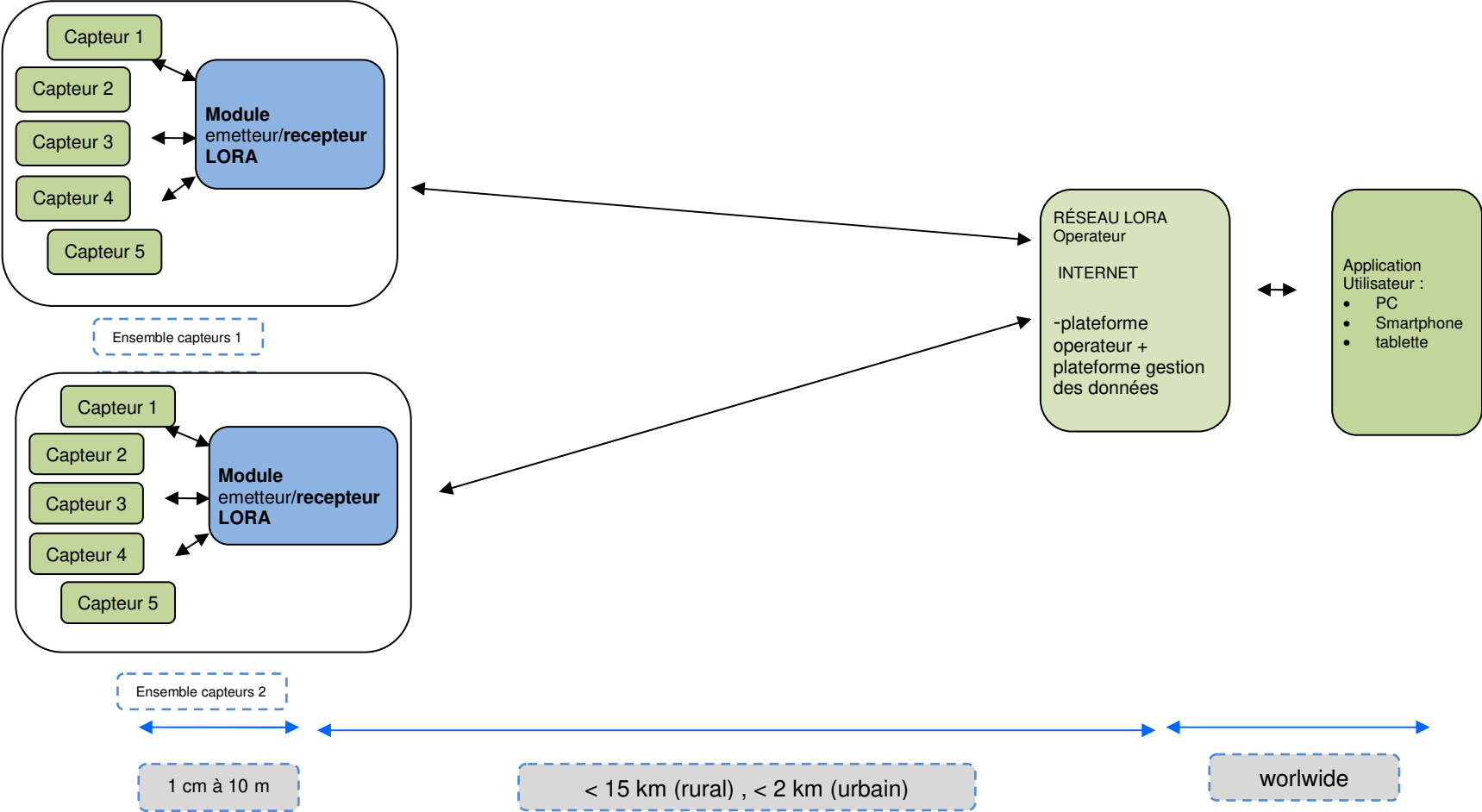
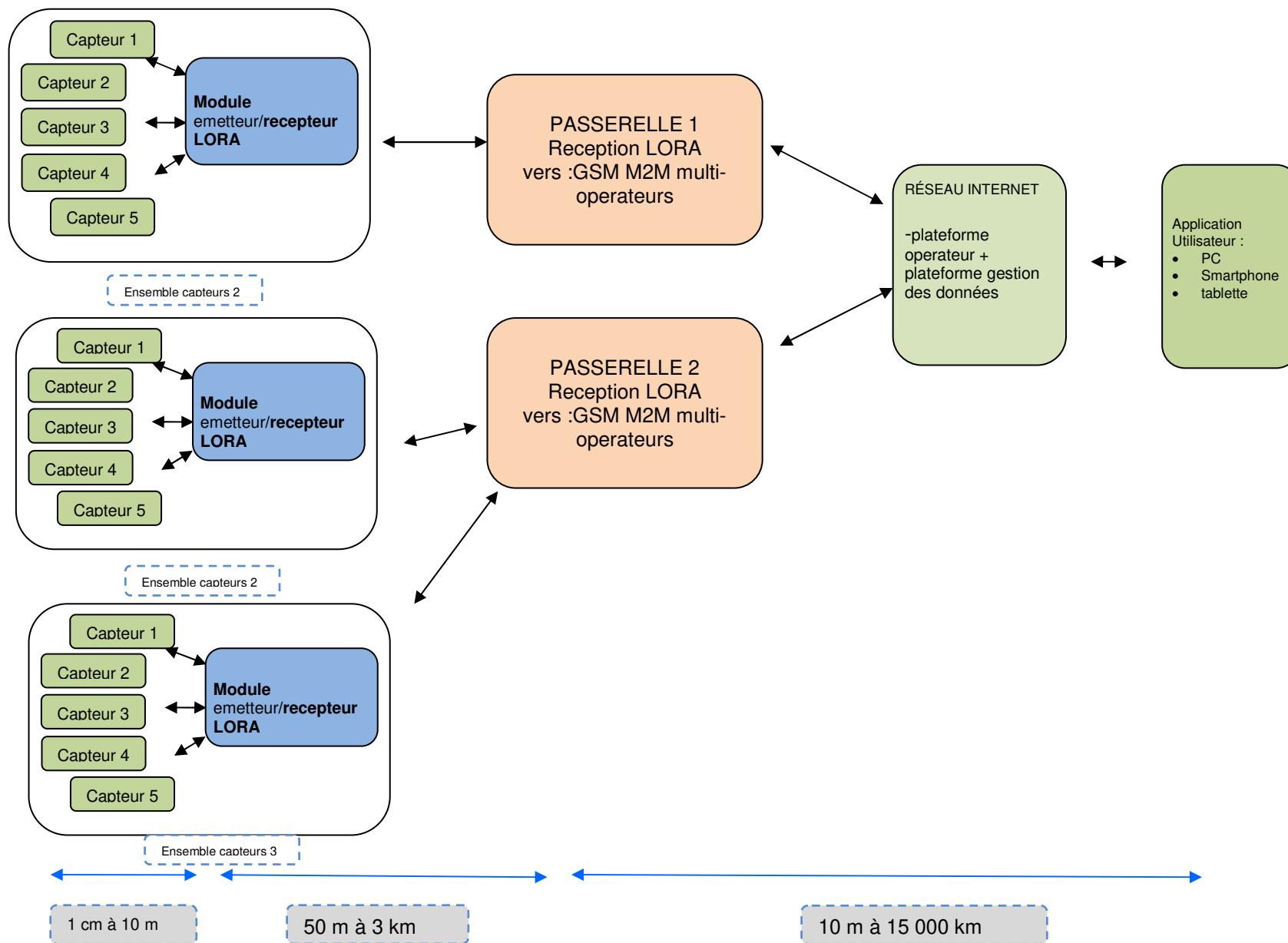


Figure 4 scénario 1 bis : site pollué en France avec couverture LORA (Orange ou Bouygues Télécom) et peu de modules capteurs (<10) (RECORD 2021)



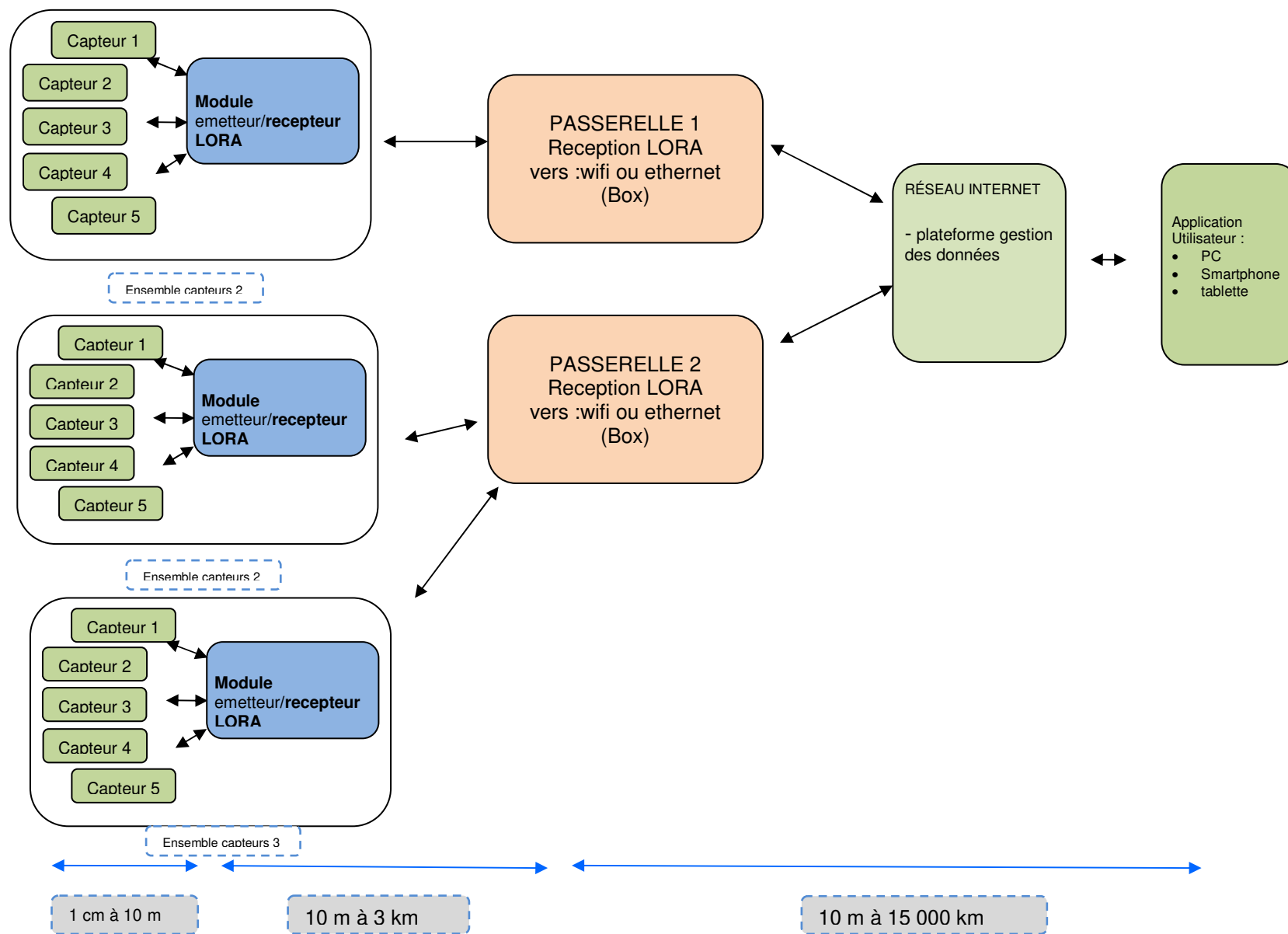
Scenario 2	Surveillance qualité de l'air en Europe de : <ul style="list-style-type: none"> • Un site pollué • Ou un site industriel ou urbain mal desservi en internet • Ou un site d'enfouissement des déchets Transmission des données (5 paramètres) par minute		
	Réseau proposé	Marques (exemples)	Prix indicatif
réseau	LORA (local) puis GSM M2M multi operateur (carte SIM)	<ul style="list-style-type: none"> • Things mobile • EMnify 	0.1€ /Mo (0.6 €/an pour 5 paramètres)
passerelle	LORA vers GSM (2, 3 ou 4G, LTE ou NB IOT) 1 ou plusieurs passerelles suivant la surface à couvrir et les obstacles	<ul style="list-style-type: none"> • KERLINK • MULTITECH 	615 € 350 €
capteurs	Munis chacun d'un Module LORA Ou plusieurs capteurs sur un même module (qui peut en accueillir au moins dix)	<ul style="list-style-type: none"> • Modules MURATA • Puce STmicroélectronics 	12 € / module 5 € /puce
Débit maximum	Les ou les réseaux locaux LORA programmés en moyenne portée permettent chacun le débit de 5 paramètres par minute Les réseaux GSM pour le rebasculement des données de la ou des passerelles sont surdimensionnés pour gérer les messages de 5 paramètres (12 octets), qui peuvent être envoyés en très grands nombres par minute		
Développement	Cout sous traitance : entre 50 000 et 150 000 euros (sans développement des capteurs et leur raccordement à un module LORA) <ul style="list-style-type: none"> • Gestion des cartes Sim • Programmation de la passerelle et des modules LORA • Personnalisation d'une plateforme cloud publique ou privée • Rapatriement des données sur la plateforme 		
Niveau de difficulté	moyen		
Délai de réalisation	Entre 6 et 12 mois		
Autonomie des modules capteurs	Plusieurs années avec pile AA (suivant le nombre d'émissions)		
Autonomie de la passerelle	Panneau solaire nécessaire (40x60 cm)		

Figure 5 scénario 2 :site pollué ou industriel mal desservi en internet ou site d'enfouissement des déchets en Europe (RECORD 2021)



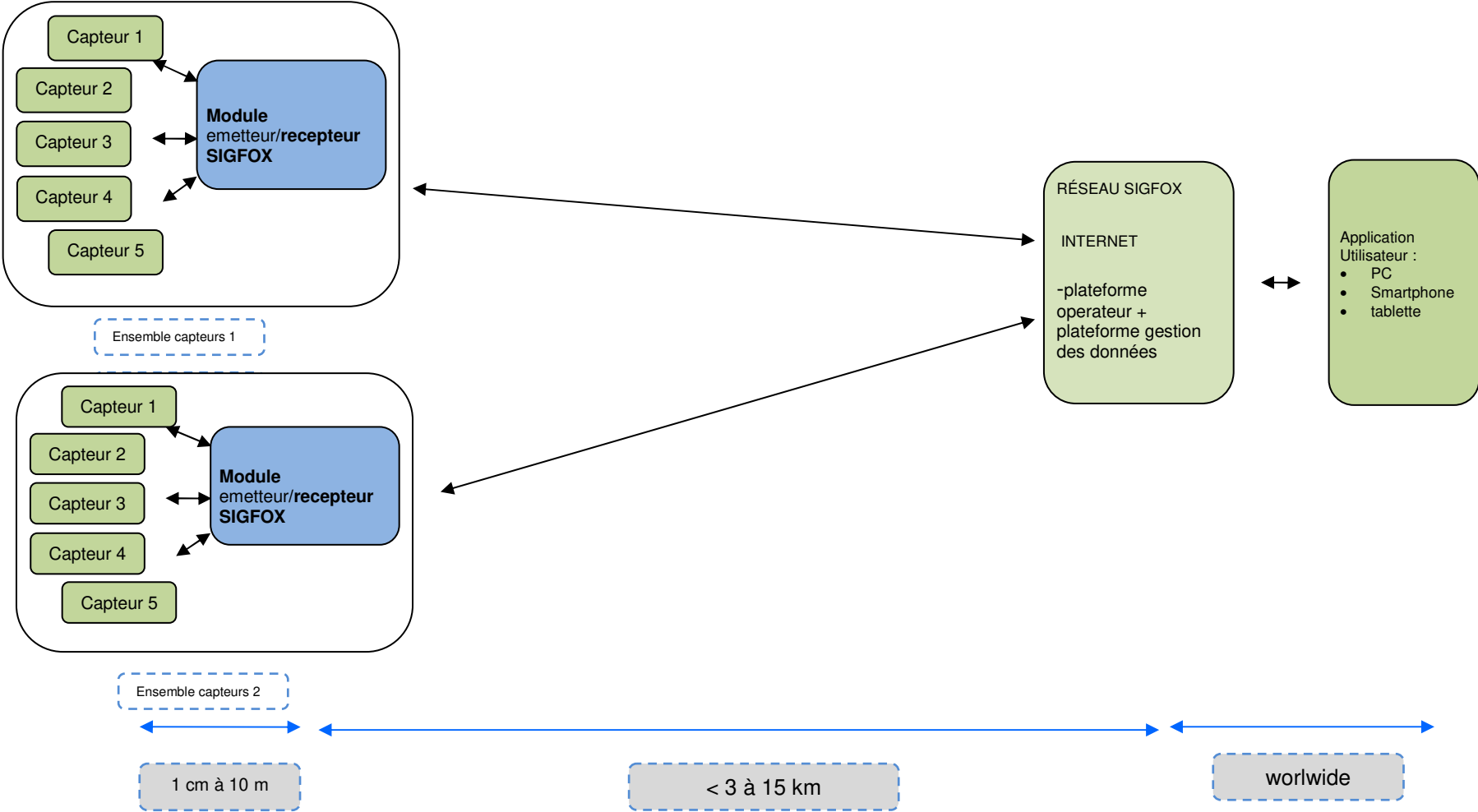
Scenario 3	Surveillance qualité de l'air en Europe de : <ul style="list-style-type: none"> Un site industriel ou abord site industriel ou urbain bien desservi en internet, Surface totale 2x2 km Transmission des données (5 paramètres) par minute		
	Réseau proposé	Marques (exemples)	Prix indicatif
réseau	LORA (local) puis connexion box ethernet/ wifi	<ul style="list-style-type: none"> Aucun operateur (hormis celui de la box) 	0. €
passerelle	LORA vers ethernet/wifi 1 ou plusieurs passerelles suivant la surface à couvrir et les obstacles	<ul style="list-style-type: none"> KERLINK MULTITECH DRAGINO 	615 € 350 € 50 €
capteurs	Munis chacun d'un Module LORA Ou plusieurs capteurs sur un même module (qui peut en accueillir au moins dix)	<ul style="list-style-type: none"> Modules MURATA Puce STmicroélectronics 	12 € / module 5 € /puce
Débit maximum	Le ou les réseaux locaux LORA programmés en moyenne portée permettent chacun le débit de 5 paramètres par minute (un envoi de données toutes les 6.2 secondes maximum)		
Développement	Cout sous traitance : entre 20 000 et 50 000 euros (sans développement des capteurs et leur raccordement à un module LORA) <ul style="list-style-type: none"> Programmation de la passerelle et des modules LORA Personnalisation d'une plateforme cloud publique ou privée 		
Niveau de difficulté	faible		
Délai de réalisation	Entre 3 et 6 mois		
Autonomie des modules capteurs	Plusieurs années avec pile AA ((suivant le nombre d'émissions)		
Autonomie de la passerelle	Panneau solaire nécessaire (40x60 cm)		

Figure 6 scénario 3 : site pollué ou industriel, bien desservi en internet en Europe (RECORD 2021)



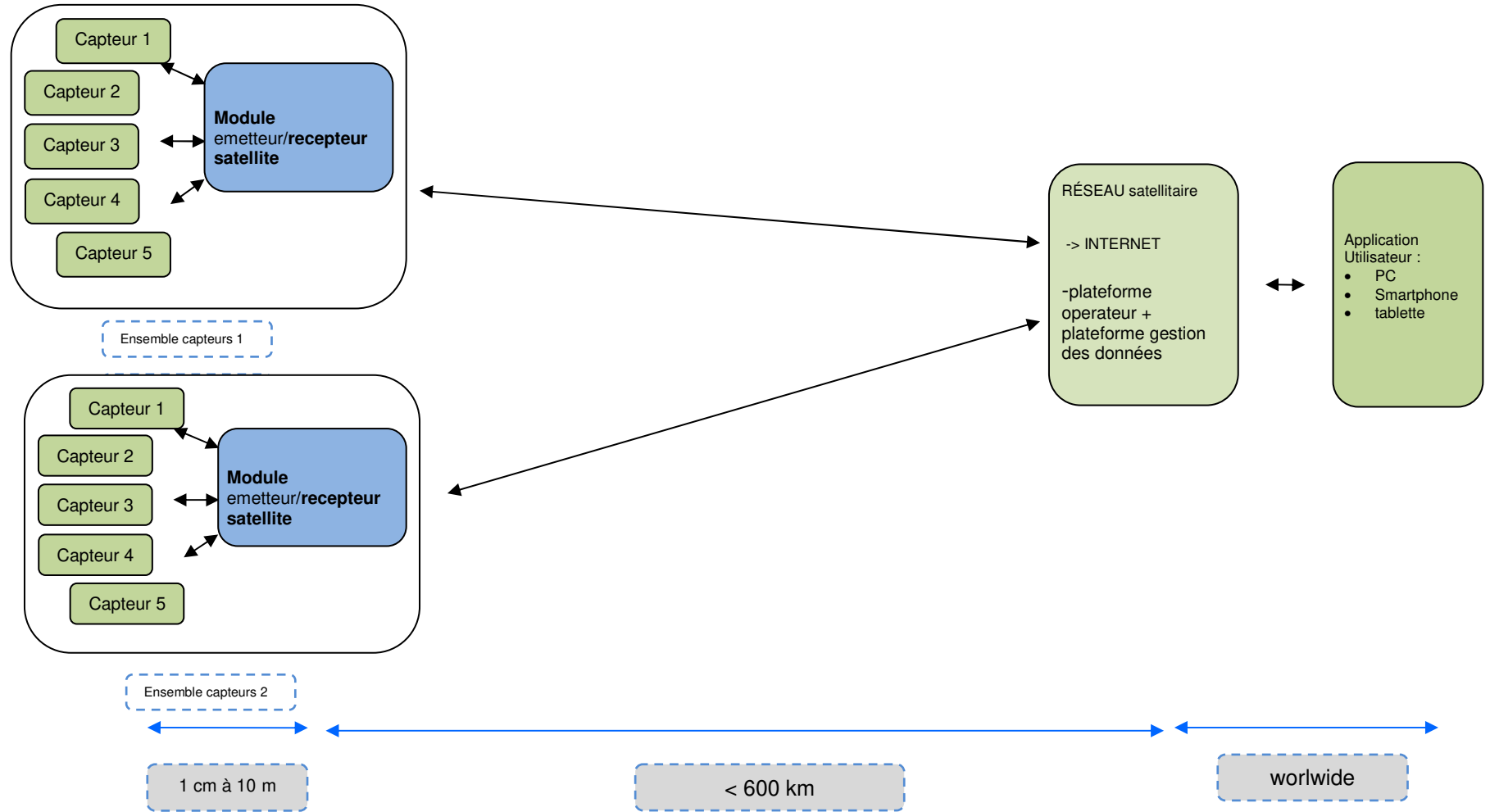
Scenario 4	Surveillance qualité de l'air en Europe de : <ul style="list-style-type: none"> • Installation d'enfouissement de déchets Transmission des données (5 paramètres) toutes les 15 à 30 mn		
	Réseau proposé	Marques (exemples)	Prix indicatif
réseau	SIGFOX Ou LORA (voir scenario 2)	<ul style="list-style-type: none"> • SIGFOX 	3 à 9 euros/an par module SIGFOX
passerelle	Sans ou si nécessaire un ré émetteur (micro gateway)	<ul style="list-style-type: none"> • Yedom 	500 €
capteurs	Munis chacun d'un Module SIGFOX Ou plusieurs capteurs sur un même module (qui peut en accueillir au moins dix)	<ul style="list-style-type: none"> • Modules MURATA • Puce STmicroélectronics 	12 € / module 5 € /puce
Débit maximum	5 paramètres maximum toutes les 10 mn		
Développement	Cout sous traitance : entre 20 000 et 50 000 euros (sans développement des capteurs et leur raccordement à un module LORA) <ul style="list-style-type: none"> • Programmation des modules SIGFOX • Personnalisation d'une plateforme cloud publique ou privée 		
Niveau de difficulté	faible		
Délai de réalisation	Entre 3 et 6 mois		
Autonomie des modules capteurs	Plusieurs années avec pile AA (suivant le nombre d'émissions)		
Autonomie de la passerelle	Sans passerelle (si besoin, un panneau solaire conviendrait)		

Figure 7 scénario 4 : zone d'enfouissement des déchets en Europe , Sigfox (RECORD 2021)



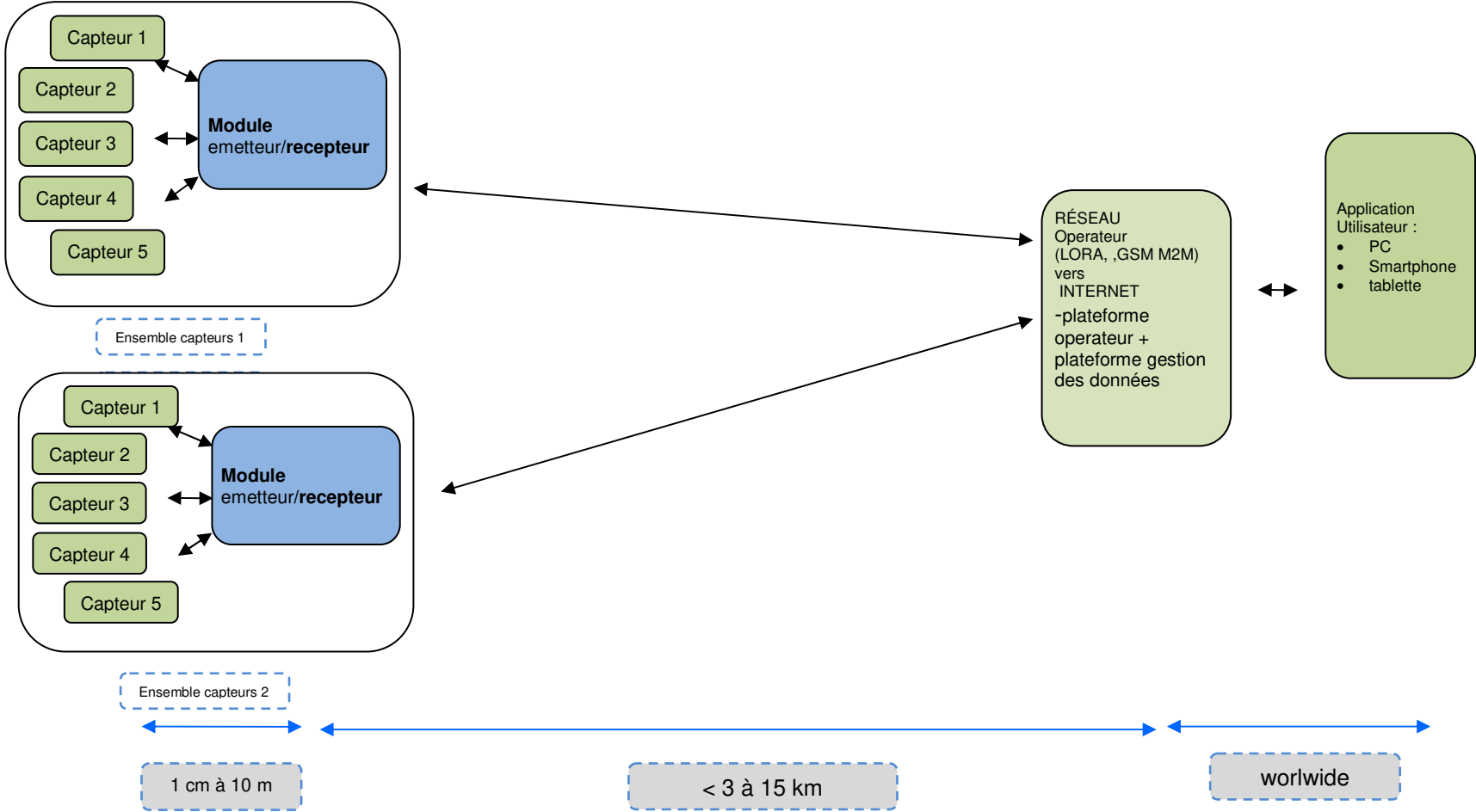
Scenario 5	Surveillance qualité de l'air dans un endroit du globe non couvert par un réseau terrestre : Transmission des données (5 paramètres) toutes les 15 à 30 mn		
	Réseau proposé	Marques (exemples)	Prix indicatif
réseau	satellitaire	<ul style="list-style-type: none"> • KINEIS • EUTELSAT (ELO) 	36 euros/an par module
passerelle	Sans		
capteurs	Munis chacun d'un Module Ou plusieurs capteurs sur un même module (qui peut en accueillir au moins dix)	<ul style="list-style-type: none"> • Modules KINEIS 	50 € / module
Débit maximum	15 paramètres maximum toutes les 20 mn (temps de revisite avec 20 satellites)		
Développement	Cout sous traitance : entre 50 000 et 100 000 euros (sans développement des capteurs et leur raccordement à un module KINEIS) <ul style="list-style-type: none"> • Programmation des modules • Personnalisation d'une plateforme cloud publique ou privée 		
Niveau de difficulté	faible		
Délai de réalisation	Entre 3 et 6 mois à partir de 2022		
Autonomie des modules capteurs	Panneau solaire indispensable ou batterie volumineuse		
Autonomie de la passerelle	Sans passerelle		

Figure 8 scenario 5 : zone sans aucun reseau terrestre (RECORD 2021)



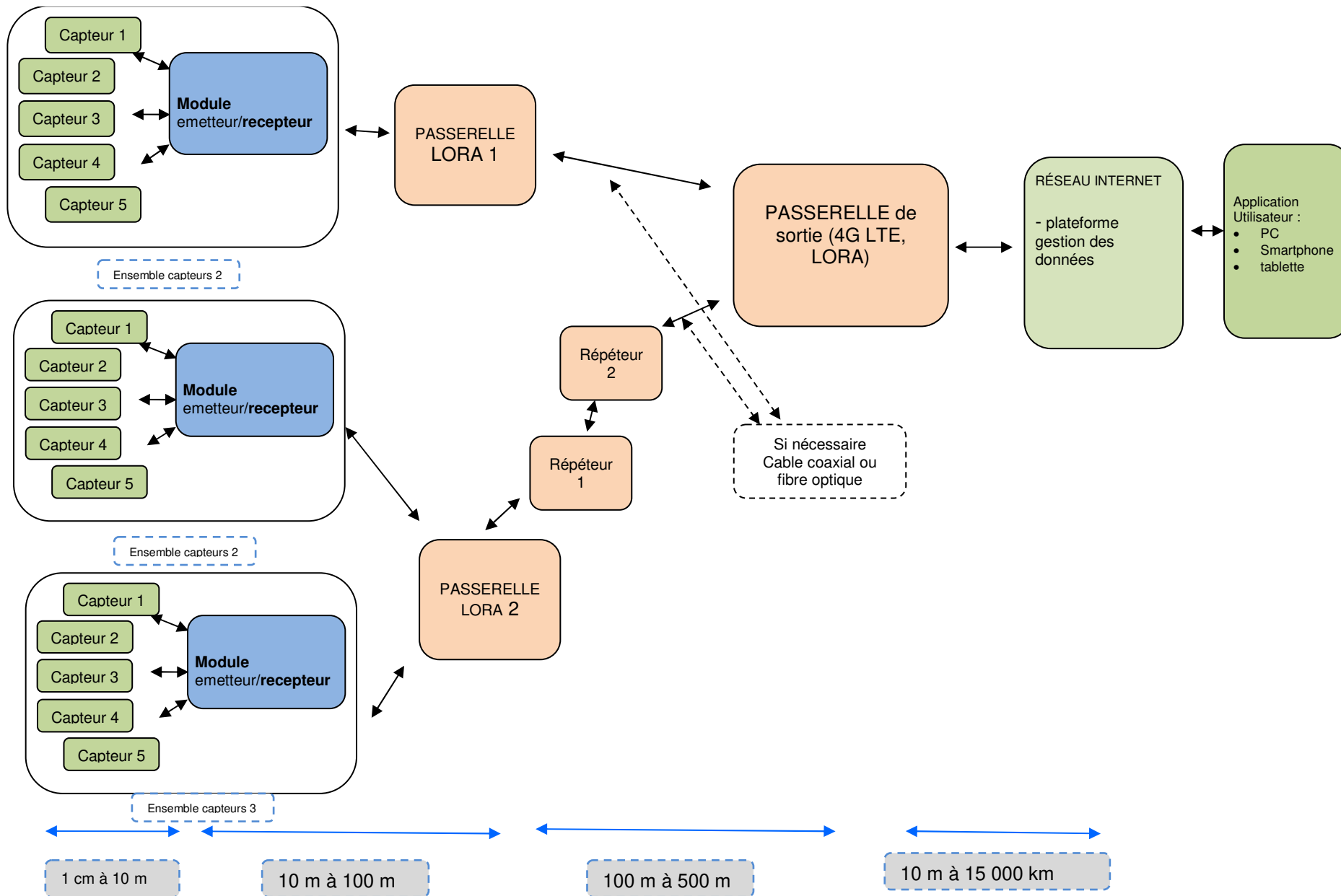
Scenario 6	Surveillance qualité de l'air par un ensemble de capteurs mobiles (véhicules, vélo, bus) : Débit de données non spécifié		
	Réseau proposé	Marques (exemples)	Prix indicatif
réseau	LORA ou M2M (2, 3,4G LTE-M ou NB-IOT) (il faut un réseau national voire international)	<ul style="list-style-type: none"> • ORANGE • BOUYGUES • TÉLECOM • SFR (NB IOT) • Ou Carte SIM multi operateurs 	Abonnement de 12 € /an pour Lora ou Sigfox Abonnement de 60 €
passerelle	Sans passerelle		
capteurs	Munis chacun d'un Module Ou plusieurs capteurs sur un même module (qui peut en accueillir au moins dix)	<ul style="list-style-type: none"> • Modules correspondant au réseau choisi 	12 € à 50 €/ module
Débit maximum	Si réseau LORA / Débit dépendant de la portée : 5 paramètres toutes 6.2 secondes jusqu'à 5 paramètres toutes les 39 mn Si réseau opérateur GSM : pas de limitation de débit ni de nombre de capteurs		
Développement Logiciel	Cout sous traitance : entre 20 000 et 50 000 euros (sans développement des capteurs et leur raccordement à un module LORA) <ul style="list-style-type: none"> • Programmation de la passerelle et des modules LORA • Personnalisation d'une plateforme cloud publique ou privée 		
Niveau de difficulté	faible		
Délai de réalisation	Entre 3 et 6 mois		
Autonomie des modules capteurs	Plusieurs années avec pile AA (suivant le nombre d'émissions et le type de réseau)		
Autonomie de la passerelle	N.A		
remarques	La localisation peut se faire avec le réseau LORA (sans GPS) ,10 à 100 mètres de précision. Mais il est préférable d'avoir la position GPS.		

Figure 9 scénario 6 : capteurs mobiles (RECORD 2021)



Scenario 7	Surveillance qualité de l'air dans des espaces confinés souterrains : (métro, tunnels, mines)		
	Réseau proposé	Marques (exemples)	Prix indicatif
réseau	Réseau privé en sous-sol et public en sortie LORA privé avec répéteurs 4G LTE avec répéteurs Wifi et répéteurs si la longueur est faible Utilisation possible de la fibre optique pour relier les passerelles	<ul style="list-style-type: none"> • ORANGE • BOUYGUES • TÉLECOM 	
passerelle	passerelle « publique » en sortie d'ouvrage (M2M GSM), plusieurs passerelles privées et répéteurs en sous-sol	<ul style="list-style-type: none"> • Kertlink • multitech 	350 à 1000 €
capteurs	Munis chacun d'un Module Ou plusieurs capteurs sur un même module (qui peut en accueillir au moins dix)	<ul style="list-style-type: none"> • Modules correspondant au réseau choisi 	12 € à 50 €/ module
Débit maximum	Si réseau LORA : Débit dépendant de la portée : de 5 paramètres toutes 6.2 secondes jusqu'à 5 paramètres toutes les 39 mn Si réseau opérateur GSM : pas de limitation de débit ni de nombre de capteurs		
Développement Logiciel	Cout sous traitance : entre 50 000 et 150 000 euros (sans développement des capteurs et leur raccordement à un module) <ul style="list-style-type: none"> • Programmation des passerelles, répéteurs et des modules • Personnalisation d'une plateforme cloud publique ou privée 		
Niveau de difficulté	élevé		
Délai de réalisation	Entre 6 et 18 mois		
Autonomie des modules capteurs	Plusieurs années avec pile AA ((suivant le nombre d'émissions et suivant le réseau choisit))		
Autonomie de la passerelle	N.A		
remarques	De nombreux essais sont nécessaires pour valider les portées des différents réseaux Le wifi et la 4G pourront être utilisés dans les métros ou ils sont installés (ce qui tend à se généraliser)		

Figure 10 scénario 7 environnement souterrain (RECORD 2021)



5.13 Exemples de modules capteurs du marché avec la fonction réseau (exemple système intérieur et extérieur)

Depuis l'avènement de l'IOT et la disponibilité de microcapteurs de gaz et de cellules de mesure du taux de particules de nombreux modules pour mesurer la qualité de l'air sont apparus sur le marché domestique et professionnel. Ils sont essentiellement issus de petites ou très petites sociétés (<10 salariés) start up.

Ou de multinationales exemple Bosch en partenariat avec Intel : Le système de contrôle de qualité de l'air « Bosch Air Quality Micro Climate Monitoring System » (prix 15k€) avec consultation des résultats dans le cloud Bosch ou Intel

<https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/faqs/bosch-mcems-faq.pdf>

Le challenge organisé par AIRLAB nous fournit une bonne évaluation des produits « environnementaux » de ces sociétés qui se divisent en 2 catégories :

Les stations extérieures connectées :

Ces stations bénéficient de réseaux longue distance (>1km en environnement urbain) et sont dites industrielles de par leur seul prix de plusieurs milliers d'euros souvent qualifié d'injustifié dans les rapports d'évaluation. Elles nécessitent des abonnements pour avoir accès aux données.

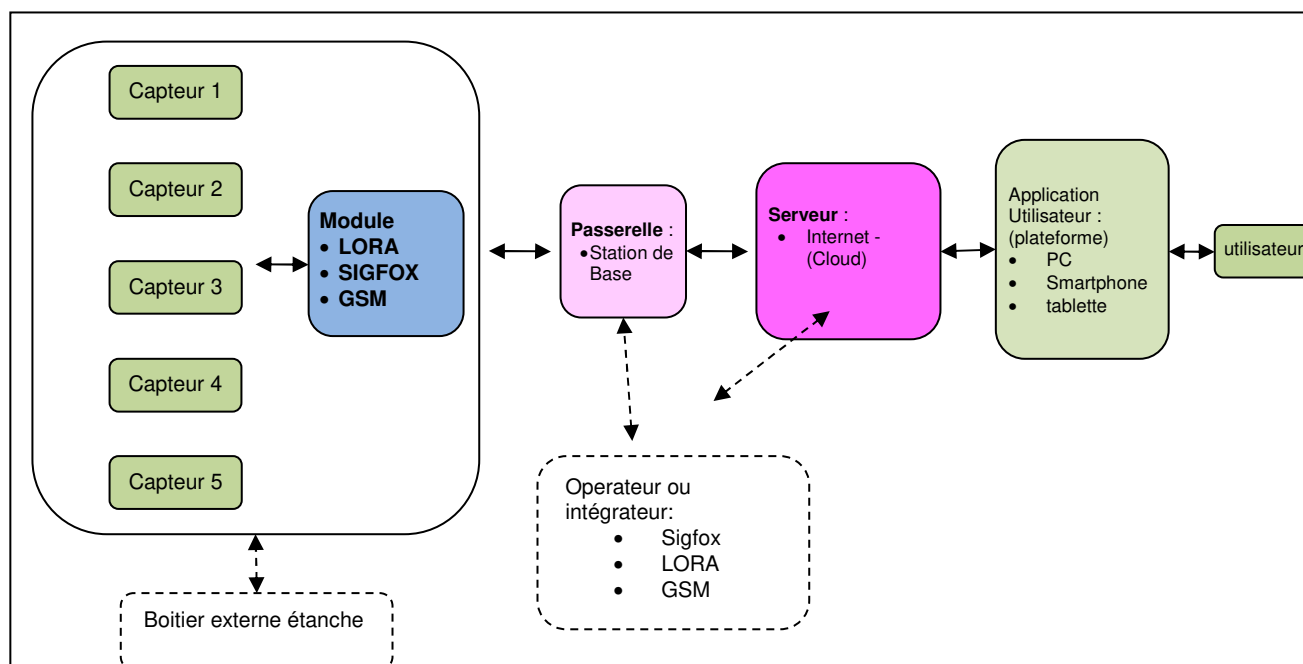


Figure 11 schéma de principe d'une station extérieure de mesure de la qualité de l'air connectée (RECORD 2021)

:

Tableau 8 prix estimatif d'une station de mesure extérieure (hors capteurs)

composant	Prix unitaire (euros)
Module LORA/SIGFOX	11 à 50
Circuit imprimé avec composants	10 à 40
antenne	1 à 10
boitier	20 à 100
Assemblage/test	10 à 50
Total prix de revient	52 à 250 euros

Stations intérieures :

Ces stations utilisent le routeur wifi des locaux dans lesquels elles sont placées (rayon de 10 à 50 mètres maximum)

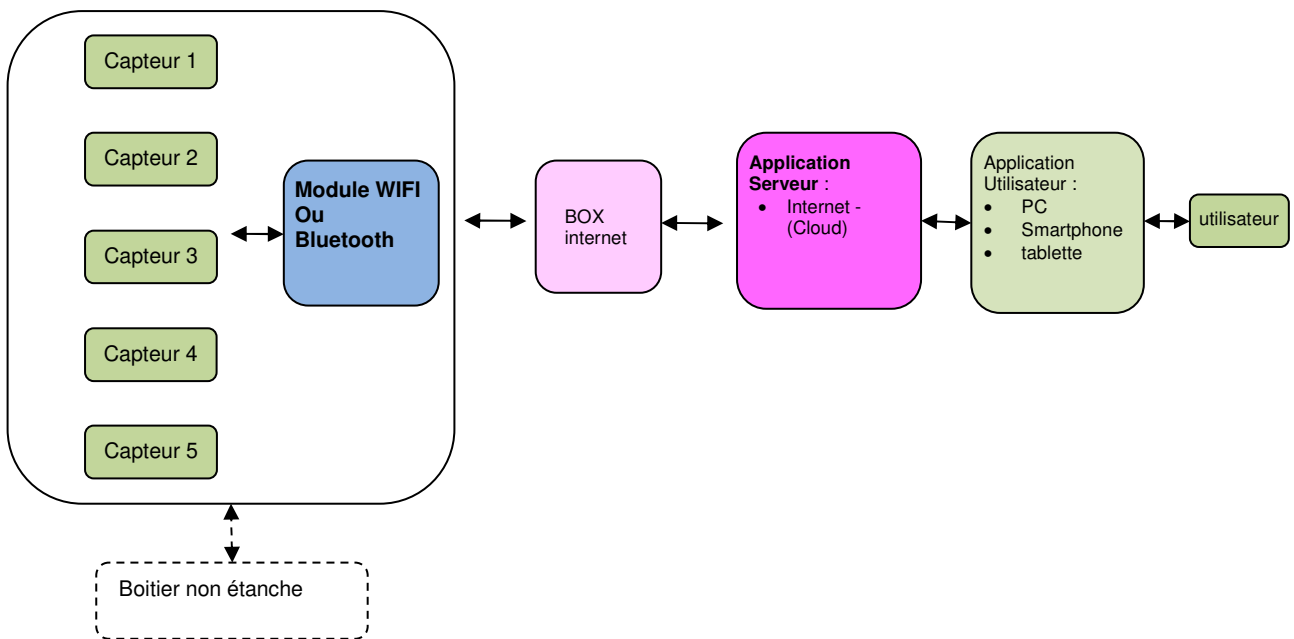


Figure 12 schéma de principe d'une station d'analyse de l'air intérieur (record 2021)

:

Tableau 9 prix estimatif d'une station d'analyse intérieur (hors capteurs)

composant	Prix unitaire (euros)
Module Bluetooth/wifi	10
Circuit imprimé avec composants	10 à 20
boitier	10 à 20
assemblage	1 à 5
Total prix de revient	31 à 55 euros

5.14 La gestion des dispositifs (device management)

La gestion d'un parc de capteurs connectés peut s'effectuer via des plateformes mises à disposition par les opérateurs des réseaux télécom ou des sociétés de service spécialisées dans l'IOT (liste en annexe). C'est particulièrement nécessaire lorsqu'on utilise des GSM avec carte SIM liées à des abonnements.

5.15 La gestion des données (data management)

La gestion des données venant des modules capteurs peut s'effectuer via d'autres plateformes développées par des sociétés de services (liste en annexe).

Le cout d'utilisation de ces plateformes est en général proportionnel aux données qui y transitent ou parfois au seul nombre de modules connectés.

6 Retour d'expériences sur les réseaux sans fil :

Les réseaux LPWAN de type SIGFOX ou LORA sont récents (<10ans), il existe donc peu de retour d'expériences, principalement des projets expérimentaux lancés vers 2016.

Les produits industriels utilisant ces réseaux se concentrent essentiellement sur la localisation (envoi des coordonnées GPS), la mesure de température/humidité, les centrales météo.

Les projets et produits antérieurs de suivis de paramètres utilisent les réseaux GSM (2G, 3G, 4G) et exceptionnellement le système satellitaire ARGOS.

6.1 Réseau LORA/LORAWAN

Supervision énergétique des bâtiments de la ville de Paris (réseau LORA et SIGFOX) :

Extraits du [rapport ENS](#) :

Ce projet a été lancé en 2016.

1500 bâtiments publics ont été équipés de sondes IOT pour :

- Envoi de consignes (température et horaires)
- Remontage des alarmes défauts
- Production de données pour optimiser les consommations

Utilisation des réseaux LORA d'Objenius (Bouygues télécom) et Sigfox.

La confidentialité des échanges est requise.

Maitrise d'œuvre : Eiffage énergie

Les capteurs provenaient de la société Connit (aujourd'hui fermée), température /humidité et compteur impulsif.

Les modules sont de la société Nemeus, proposent Sigfox et Lora, le choix entre les 2 est fait après une période d'évaluation et de comparaison de 15 jours (qui dépend de la couverture des 2 réseaux)

Les sondes en Sigfox envoient 3 fois la donnée pour sécuriser d'où une consommation supérieure : LORA a été retenu pour la majorité des sondes

149 sondes sur 3963 ne communiquent plus, 149 n'ont jamais communiqué (car placées en sous-sol)

Plusieurs sociétés sont intervenues dans la réalisation :

- Eiffage
- Connit
- Sigfox
- Objenius
- Technilog (développement d'un serveur et interfaçage avec le superviseur historique)
- ATOS (sécurisation des données)

Serveurs : celui d'Objenius dont les données sont récupérées par le serveur DevIO de Technilog qui les transmet au superviseur Panorama qui stocke les données et peut les restituer sur mobile

Bilan :

- La supervision du confort des salles accueillant du public est acquise pour un cout d'installation très faible
- Une supervision limitée des chaufferies non rénovées

Retour d'expérience d'un déploiement LORAWAN à Strasbourg

Une expérimentation a été lancée en 2016 par un laboratoire spécialisé dans les technologies de l'IOT : Icube (UMR 7357, CNRS) : [article de présentation du projet](#)

Autres participant à ce projet : l'Eurométropole de Strasbourg et la société Stratagem

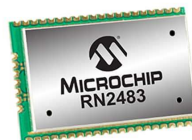
Les gateway (passerelles) LORA ont été faites sur mesure par la société Stratagem (start up Strasbourgeoise) pour permettre une analyse fine du fonctionnement, ce que ne permettaient pas les passerelles disponibles (Cisco, Kerlink, Multitek etc.)

Les modules (end devices) choisis sont similaires identiques à ceux du projet [mind4stormwater](#)

- carte d'évaluation Microchip LORAMOTE 10422 (60 €)



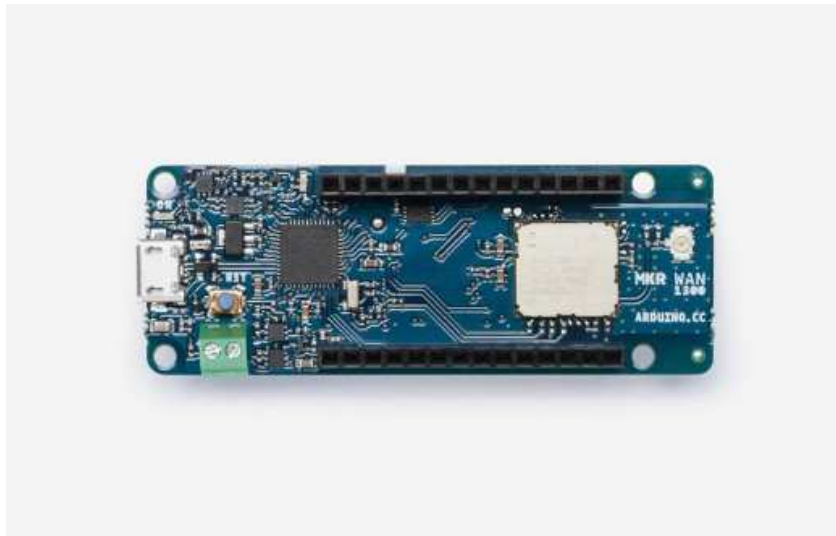
Modem Microchip RN2483 (10€) : contient le protocole LORA



Arduino (mega, FIO): carte microcontrôleur (24 €)



Arduino MKR1300 (35 €). carte Arduino munie d'un modem LORA de Murata



Pycom LOPY (V1 et V4) (30 €): carte avec microcontrôleur (esp32) et module LORA/Sigfox



Cout des passerelles : 210 €

- carte raspberry pour piloter la passerelle
- Un concentrateur LORA (peut recevoir simultanément plusieurs signaux sur 8 canaux)
- Boitier, alimentation, antenne simple

Serveurs informatiques :

Utilisation d'un gestionnaire de cloud : Opennebula

Infrastructure : les concentrateurs LORA (1000 €) déploiement sur les toits (1000 € par toit)

La portée d'antennes a été évaluée :

Type d'antenne	Portée observée
Intérieure 20 cm	1km
Intérieure type trident 50 cm	4 km
Extérieure omnidirectionnelle 100 cm	15 km (70 km avec un ballon sonde)

Figure 13 : influence de l'antenne sur la portée LORA

Bilan de ce projet :

1. Un pré projet de déploiement d'instruments connectés à l'aide de **réseaux maillés zigbee** c'est révélé trop contraignant car la distance maximale de 50 mètres entre chaque nœud nécessitait un réseau trop dense.
2. mise en évidence de **l'importance du positionnement des antennes** (confirmée par le tableau précédent)
3. importance du formatage des données transmises
4. il faut soigner les mises à jour par le réseau (OTA, over the air) pour homogénéiser le système (possible avec les pycom)
5. nécessité d'installer des **systèmes ouverts** (capteurs, groupe de capteurs, modules capteurs) pour faciliter les interfaçages et éviter l'obsolescence en cas de disparition d'une société : utiliser des modules prêts à l'usage qu'il suffit d'enregistrer sur toute plateforme et activer
6. avec quelques dizaines de milliers d'euros on peut couvrir une ville autorisant des objets connectés partout
7. intérêt financier de posséder sa propre infrastructure LORAWAN qui permet d'éviter les offres verticales segmentées (réseaux de capteurs spécifiques avec traitement spécifique)

Gestion innovante des actifs pluviaux dans les villes du futur (projet mind4stormwater) (réseau LORA)

Projet soutenu dans le cadre de des projets de R&D Horizon 2020 de la communauté européenne
planning : 2018-2021

Les partenaires sont

- L'université de Lyon 1
- Le laboratoire DEEP de l'INSA de Lyon
- L'université de Melbourne (Waterway ecosystem research group)

[Mind4Stormwater](#), financé par l'Europe vise à aider les villes à parvenir à une gestion durable de leurs « mesures de contrôle des eaux pluviales » (sigle SCM en anglais pour « stormwater control measures ») Les mesures de contrôle des eaux pluviales font référence à des solutions fondées sur la nature dédiées à la gestion des eaux pluviales, atténuant les impacts négatifs des réseaux de canalisations d'eaux pluviales traditionnelles. Ces techniques sont souvent appliquées à ou près de la source de ruissellement : rigoles, tranchées d'infiltration, toitures végétalisées ou routes poreuses, etc. Les SCM sont apparus dans le monde entier au cours des dernières décennies, ce qui signifie que leur gestion à long terme est loin d'être assurée. Les questions opérationnelles et de recherche se sont jusqu'à présent largement concentrées sur l'optimisation des performances hydrologiques, hydrauliques et de qualité de l'eau. Cependant, il existe une préoccupation croissante concernant la gestion durable à long terme et son impact sur les performances et les coûts. Une telle préoccupation limitera probablement l'application et le développement des SCM. D'autre part, l'exploitation et la maintenance de SCM pourraient créer de nouvelles opportunités commerciales liées aux capteurs, à la surveillance et à la gestion des actifs. Selon l'ONU, investir 188 milliards de dollars américains pour gérer les eaux pluviales et préserver la qualité de l'eau aux États-Unis pourrait générer 265 milliards de dollars américains d'activité économique et créer près de 1,9 million d'emplois. La situation est probablement très similaire avec les 600 000 emplois directs dans le secteur des services d'eau de l'UE.

Mind4Stormwater adaptera les capteurs technologiques à faible coût existants au contexte spécifique des SCM et développera un système expert innovant pour guider le gestionnaire des services publics dans la sélection des meilleures actions O&M pour chaque SCM. Le système expert sera développé sur une étude de cas australienne avec une base d'actifs de 500 SCM. Il sera ensuite adapté pour les villes françaises et un projet d'adaptation pour les villes européennes sera développé. Mind4Stormwater s'attaque à un problème majeur qui émerge dans le monde entier. Une série d'activités de sensibilisation permettra également de sensibiliser le public à l'importance majeure de la gestion intégrée de l'eau urbaine.

Le projet a consisté dans

- 1) le développement d'une plateforme de test des capteurs de niveau en laboratoire (utilisation d'une carte Arduino)
- 2) tests sur le terrain avec envoi sur le réseau LORAWAN
- 3) test en Australie dans des zones non desservies par un réseau public

Le système déployé en Australie est constitué de cartes de développement Arduino muni d'un module LORA (MKR1300) auquel on rajoute une horloge (RTC) et un module de stockage de données (SD card)

Ce module MKR1300 reçoit les données d'un capteur de hauteur d'eau et température via un protocole public spécifique SDI-12 utilisé pour les capteurs hydrologiques. Il stocke les données dans la SD carte et l'envoi, via le protocole LORA, vers une passerelle LORA constituée de la même carte MKR1300 elle-même pilotée par une carte « électron » de la société Particle qui apporte une connectivité 3G à l'aide d'une carte SIM.

Une plateforme de la même société Particle assure le transfert des données vers Google spreadsheet

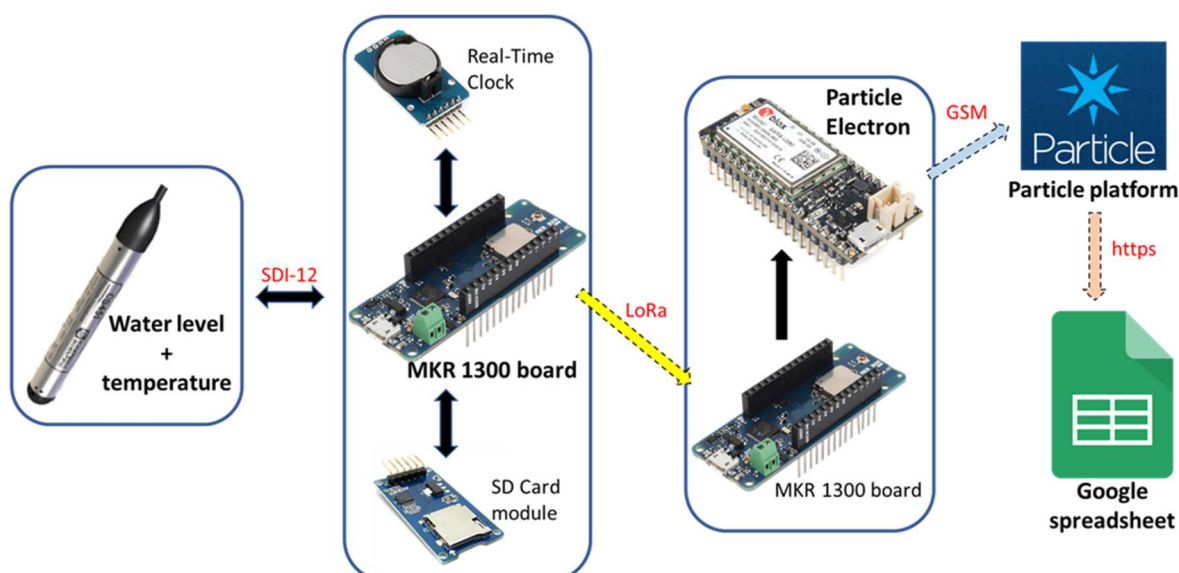


Figure 14: projet Mind4Stormwater : schéma simplifié du réseau de capteurs

Bilan (provisoire)

- Le réseau Sigfox est bien déployé en Australie (mieux que LORA), c'est l'inverse en France
- Les réseaux sur fréquence libre (Sigfox Lora) seraient plus sujets à interférences que les réseaux sous licence (NB IOT LTE)
- Importance du long terme et de la maintenabilité des systèmes

Projet CENSE :

- Un projet de R&D a été lancé, CENSE, piloté par l'IFFSTAR avec la ville de Lorient comme site d'expérimentation qui utilise les lampadaires pour hébergement des capteurs et le réseau LORA de Bouygues Telecom'. Les capteurs de bruits sont reliés au réseau filaire CITIBOX qui pilote les lampadaires
- Les capteurs de bruits servent de passerelle LORA aux capteurs de bruits sans fil placés à 30/50 mètres des lampadaires. Le projet se finit en 2021

6.2 Réseaux cellulaires (GSM)

Le réseau de mesure des niveaux d'eau SCHAPI multiprotocoles

3200 stations en service utilisé par le SCHAPI pour prévoir les crues (informations du SCHAPI) :

Schapi : Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (service du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie) implanté à Toulouse, administre la banque et gère les services associés à HYDRO. Il en assure également les évolutions.

- Réseaux cellulaires IP privé (GPRS, 3G, 4G) 66%
- Le reste : ADLS, satellites, internet hertzien (IP privé), RTC (réseau téléphonique fixe avec modem supprimé en 2023) en cours de basculement vers le réseau cellulaire IP (
- Sur les cours d'eau les plus réactifs (changements brusques) des systèmes radio propriétaires
- LORA et LTE-M seront testés à partir de 2021
- En Guyane les satellites ARGOS sont utilisés

Gestion des déchets

Sigrenea (rachetée en 2016 par SUEZ)

Sigrenea commercialise une solution clés en main de gestion intelligente de la collecte de déchets. Cette solution associe des capteurs à ultrasons, installés dans les conteneurs et recueillant des données de remplissage, avec un outil de visualisation et d'analyse de ces données.

Cela permet aux opérateurs chargés du ramassage des ordures, sur la base de données en temps réel et d'historiques, de mieux planifier les itinéraires.

AIRLAB : 500 microcapteurs fixes et mobiles déployés (réseau GSM 2, 3,4G)

Projet en cours lancé par AIRLAB et remporté par LA POSTE (sa filiale DOCAPOST qui gère l'inter connectivité).

- Les capteurs du système ATMOTRACK sont développés par la société nantaise 42factory (pme de 10 personnes).
- Chaque centrale de mesure peut analyser : PM1, 2.5, 10, NO2, CO, NH3
- A Paris 450 centrales sont montées sur des véhicules de la poste 50 sur des vélos et 10 en poste fixe.
- D'autres centrales fonctionnent à NANTES LYON et à l'étranger (Afrique, Espagne Belgique, Pays Bas, Mexique).
- Le réseau utilisé est GSM 2G qui va bientôt passer en 3G et 4G.
- Les réseaux LPWAN (Lora Sigfox) ne sont pas utilisés puisqu'il faut pouvoir reconfigurer les centrales facilement (OTA, on the air) par le réseau sans accès physique aux centrales.
- Le nombre de données, mesures toutes les secondes et transmission toutes les 10 secondes, plaide pour l'utilisation des réseaux GSM M2M.

Le choix pour le réseau GSM M2M a été motivé par la quantité de données qui émanent des capteurs

Réseau permanent de mesure de bruit de la Métropole de Lyon :

Le réseau permanent de mesure et de suivi du bruit sur le territoire de l'agglomération de la Métropole de Lyon, accouté, existe depuis 2004 et est constitué de 19 stations de mesure.

La transmission se fait par le réseau 4G ou par ethernet (filaire).

Plusieurs autres villes utilisent le même système.

6.3 Quelques exemples de produits industriels

Utilisant le réseau LORA

- Module sentinelle du groupe CAHORS qui permet de surveiller les réseaux électriques moyens tension
- Gestion de flotte de véhicules bennes avec déchets de terres excavées (hesus ubysol)
- Suivi de la température de container de froid (JRI), réseau LORA orange et plateforme liveobjects
- Suivi de benne et container N'track de Ela innovation
- Les compteurs d'eau de Birdz (filiale de Veolia et Orange)
- Vinci autoroutes : Tester les usages sur une aire de repos de grand passage (Aire de Boutroux) avant d'en généraliser le déploiement
- Stations météo

Utilisant le réseau SIGFOX

- Gestion du parc de remorques de Total (via Stela)
- Tracking des tableaux électriques sur chantier pour lutter contre les vols (Legrand)
- Tracking des colis (DHL)
- Sécurité (FREEBOX)
- Stations météo

Utilisant le réseau cellulaire 2G/3G/4G

- Plusieurs variétés de capteurs de suivi de la qualité de l'eau de consommation, de surface, par Birdz (filiale de Veolia)
- Inflowmatix (Suez actionnaire) : réseaux de capteurs de pression dans les conduites d'adduction d'eau pour surveiller les efforts et anticiper les ruptures utilisation du réseau 3G car le flux de données est trop important. L'autonomie par pile est de 3 ans grâce à pré analyse dans le capteur et une compression de données

6.4 Statuts de la R&D sur les réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil ne constituent pas un domaine de recherche spécifique. C'est un sous domaine de l'informatique et de l'électronique.

Les sujets porteurs (type de réseaux, problématique)

Les laboratoires publics traitent principalement des sujets de sécurité (cryptage, qualité de services) et de saturation des réseaux. Les réseaux étudiés pour l'IOT sont essentiellement LORA et SIGFOX

Les laboratoires publics français concernés par l'IOT

- l'institut des nanotechnologies de Lyon : réseaux de capteurs sans fil à très basse énergie
- l'IRIT (institut de recherche en informatique de Toulouse) : réseaux d'objets connectés sans fil et IOT
- Le laboratoire d'informatique de Grenoble (LIG) : département DRAKKAR thèmes : réseaux IOT et sécurité
- Laboratoire des sciences du numérique de Nantes : département RIO, réseaux pour l'internet des objets (réseau de capteurs ultrasons dans les marais salants pour suivre l'évaporation des eaux)
- Laboratoire de physique de Clermont-Ferrand : réseau de capteurs sans fil pour la détection de polluants (CO, NO)
- Labex IMU de Lyon (laboratoires d'excellence, projet intelligences des mondes urbains) : urpolsens (2015) réseau de capteurs sans fil pour le suivi de la pollution urbaine
- Le CITI, (Centre of Innovation in Télécommunications and Integration of Services) : laboratoire associé à l'INSA Lyon et à l'INRIA.

7 Analyse critique des différentes solutions proposées

Le choix entre les solutions réseaux proposées, mixtes entre LORA, SIGFOX, GSM M2M, wifi et Bluetooth dépendra bien souvent du choix du sous-traitant qui privilégiera la technologie qu'il connaît bien. Les sous-traitants maîtrisant l'ensemble des technologies seront plus à même de choisir une solution optimale qui sera le résultat de compromis.

Les critères de choix, à exprimer dans un cahier des charges, seront principalement :

- La portée des réseaux dans l'environnement considéré : les portées annoncées sont très souvent théoriques et ne correspondent pas à la réalité du terrain, les tests préalables de disponibilités/couverture des réseaux sur sites sont indispensables
- La couverture du réseau : si vous envisagez de déployer un réseau national ou européen ou international il faut vérifier la couverture des zones et la progression annoncée et effective (l'arcep propose une cartographie qui teste l'adéquation entre données opérateurs et mesures)
- Le débit : pour des réseaux de capteurs, les réseaux GSM (xG, LTE-M, NB-IOT) sont surdimensionnés, compromis entre débit et portée pour LORA, SIGFOX a un faible débit qui peut être suffisant
- La mobilité des capteurs (montés sur des véhicules, des vélos, dans des trains, des bateaux)
- Facilité de mise en œuvre du réseau (minimum d'intermédiaires, choix de solutions sur étagères)
- L'autonomie des capteurs : dans des sites éloignés, non raccordés à un réseau électrique il est préférable d'alimenter avec des panneaux solaires ou de surdimensionner la taille des piles/batteries. Le choix des réseaux est déterminant pour l'autonomie (seuls LORA et SIGFOX vont permettre l'autonomie de plusieurs années avec une pile)
- La possibilité de faire évoluer le réseau sans de nouveaux développements coûteux (mettre plus de modules capteurs, changer le logiciel par envoi du nouveau programme sur le réseau (OTA, over the air))
- La pérennité du réseau et de la société qui a développé l'application (l'idéal est de pouvoir récupérer les codes sources de l'application pour les transférer et pouvoir les retravailler)
- La qualité des réseaux : il est très difficile d'obtenir des données qualité sur des produits industriels tant la concurrence est présente
- Coût de la solution : suivant le choix de la solution et des sous-traitants le devis pourrait varier dans un facteur de 1 à 100, de la junior entreprise ou le freelance à la société de service multinationale

Importance primordiale de la hauteur des antennes, effet de sol

Loin d'être anecdotique, la hauteur des antennes, à la fois du relais et du module capteur, est très importante pour la portée du réseau. Elle peut varier d'un facteur 1 à 20 (200 mètres à 4 km).

Une portée théorique de 10 km au sol peut atteindre 70 km réelle dans l'espace (constaté avec des ballons sondes). Ce qui explique la facilité de communiquer avec des satellites.

Lorsqu'on installe un réseau privé, la passerelle devra être mise le plus en hauteur possible (toits par exemple).

En cas de mauvaise transmission, les modules capteurs au sol (c'est d'autant plus vrai pour les modules capteurs en sous-sol) auront préférentiellement une antenne déportée. Un simple câble coaxial dénudé sur quelques centimètres à son extrémité fait l'affaire. C'est la stratégie à adopter sur des sites éloignés et mal couverts.

Portée des réseaux :

Les portées annoncées par les fabricants de puce ou de réseaux sont les portées maximum en conditions de visibilité maximum (line of sight, LOS ou ligne de mire) c'est-à-dire sans obstacle, ne tenant pas compte de la courbure de la terre (on ne voit plus au-delà de 4.7 km à 1.7 mètres de haut, hauteur des yeux, sur un sol plat, la mer par exemple)

Plusieurs paramètres influent sur la portée des réseaux sans fils, les plus importants sont

- La fréquence d'émission
- La puissance d'émission
- La sensibilité du récepteur
- La hauteur des antennes de l'émetteur et du récepteur (entre 0m de haut et 3m on triple la portée)
- Les obstacles entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice (végétation, murs)

- Les conditions atmosphériques (humidité, pollution, température, pression, degré d'ionisation de l'air)

Lorsqu'on choisit un réseau et la puissance d'émission maximum, seule la hauteur des antennes est réglable

Un calculateur en ligne permet d'évaluer rapidement l'influence de ces facteurs : [calculateur de portée](#)

Exemple : pour une puissance d'émission de 14 dBm (maximum en France pour la bande ISM)

Tableau 10 portée fonction de la hauteur des antennes

(en mètres)	Hauteur de l'antenne relais/passerelle (mètres)			
	1 m	3 m	6 m	12 m
hauteur antenne module				
0 m	223	387	548	775
1 m	707	1226	1734	2452
2 m	1000	1734	2452	3468
3 m	1226	2123	3003	4247

Ce tableau montre **l'extrême importance de la hauteur d'antenne** du capteur : par exemple, un capteur au sol aura une portée de 387 m alors qu'avec une antenne à 3 mètres sa portée devient 2123 mètres

On aura donc intérêt à privilégier des antennes extérieures pour les capteurs dans des projets nécessitant une longue ou très longue portée. Le prix des antennes extérieures de 3 mètres se situe dans la gamme 10 à 20 euros.

Effet de sol

La nature plus ou moins conductrice des sols influe fortement sur la propagation des ondes électromagnétiques, le sol pouvant jouer un rôle miroir vis-à-vis des ondes ou absorbant. Le taux d'humidité est aussi important et des essais sur sol sec devront être suivis d'essais sur sol mouillé (de manière identique à l'influence du taux d'humidité de l'air).

Maillage :

Lorsque la portée n'est pas suffisante il faut augmenter le nombre de passerelles lorsque le réseau choisi le permet (moins de 1000 euros pour LORA privé et opérateur et SIGFOX) c'est plus difficile avec le réseau GSM M2M et laissé à la discrétion de l'opérateur.

Dans le milieu urbain ou suburbain les multiples obstacles peuvent rendre aléatoire la bonne réception des signaux. L'ajout de passerelles peut s'avérer judicieux, mais la difficulté de trouver un site pour les mettre sera à prendre en compte (les toits, leur accès et raccordement au réseau électrique). La multiplication des passerelles permet une meilleure localisation par le réseau.

7.1 Développer ou faire développer son réseau de capteurs environnementaux

On trouve sur étagère des réseaux de microcapteurs, tels ceux participants à l'Airlab challenge, qui proposent un nombre limité de mesures et pour lesquels le système de traitement de données est verrouillé.

Dès lors que l'on souhaite connecter des capteurs plus complexes ou spécialisé (niveau, pH, gaz divers, etc.), ou traiter des données venant d'autres capteurs, on doit engager une opération plus complexe qu'un simple achat sur catalogue.

La complexité de la chaîne IOT est telle, du capteur à l'interface visuel opérateur, et les offres de produits si nombreuses, qu'il est impossible de réaliser un réseau de capteurs soit même.

Un simple assemblage d'éléments achetés chez les distributeurs demandera un certain nombre de connaissances en informatique et électronique.

Quatre stratégies permettent la mise en place d'un réseau de capteurs opérationnel

La stratégie à retenir va dépendre :

- Des moyens financiers de la société/administration
- Des compétences internes et de leur disponibilité
- D'un planning serré ou non
- Volonté de garder la main sur le système

1) sous-traitance intégrale à un bureau d'études/intégrateur (voir des exemples dans le paragraphe [intégrateurs](#))

Le projet est confié à une société extérieure ou à un autre département de la société

- Charge de travail : définition et rédaction du cahier des charges et le choix du sous-traitant
- Niveau de compétence requis : bien maîtriser son besoin en mesures, aptitude à la négociation commerciale
- Risque : mauvais choix du sous-traitant (choix technologiques hasardeux, pérennité du sous-traitant et des composants) sous-traitance en chaîne, délais en série
- Avantage : garantie de bon achèvement et de maintenance (si sous-traitant pérenne)
- Inconvénient : coût hors de portée des TPE/PME/laboratoires universitaires, délais de réalisation, choix technologiques incontrôlables, position dominante du sous-traitant (modifications ultérieures coûteuses), évolution bridée technologiquement par le sous-traitant

Selon la complexité et l'étendue du réseau (local, national) le coût du développement pourra varier de 100 k€ à 2 millions d'euros (voir [un exemple de devis](#)) et bien plus pour des projets de grande envergure.

La taille de l'intégrateur peut varier de 1 à 430 000 employés

2) maîtrise d'œuvre et sous-traitance à plusieurs sous-traitants

Le projet peut être découpé en plusieurs modules, confiés à différents acteurs, vous assurez la maîtrise d'œuvre du projet

- Charge de travail : définition de l'architecture du réseau complet, choix des composants, choix des sous-traitants
- Niveau de compétence requis : très bonne connaissance des diverses technologies, aptitude à la gestion de projet
- Risque : mauvais choix de l'architecture des composants ou des sous-traitants,
- Avantage : délais de réalisation (travail en parallèle possible), moins d'impact en cas de défaillance d'un sous-traitant
- Inconvénient : gestion de projet énergivore, pas de garantie de bon achèvement des travaux, responsabilité des problèmes potentiels difficilement adressable, maintenance problématique (qui est responsable ?)

3) maîtrise d'œuvre sous traitée à un consultant

Même cas de figure que l'option 2, vous rajoutez une interface qui peut palier vos lacunes en technologies. Le choix du consultant est, dans ce cas, déterminant.

4) réalisation en interne du réseau avec des composants sur étagère (ou non) et un minimum de programmation

De plus en plus de composants permettent la réalisation de réseaux de capteurs « en kit » mais demandent tout de même de bonnes connaissances en informatique (codage en C, python, PHP, html, etc.)

L'utilisation de plateforme généraliste (de type kheiron), ne nécessitant pas de codage (programmation), peut remplacer la difficulté de personnalisation des plateformes de type azure (Microsoft), AWS (Amazon), Google IoT core

- Charge de travail : dépendra fortement du choix des composants
- Niveau de compétence requis : expertise des diverses technologies dont informatique, aptitude à la gestion de projet
- Risque : mauvais choix de l'architecture et des composants
- Avantage : délais de réalisation (travail en parallèle possible), couts maîtrisés, utilisation possible de capteurs « exotiques » sur mesure
- Inconvénient : projet qui peut demander plusieurs mois à une équipe de 2 à 3 personnes

8 Conclusions

La première conclusion est la non disponibilité, sur catalogue, de réseaux de capteurs permettant de mesurer tous les paramètres environnementaux réglementés. Seules quelques TPE et PME proposent des centrales de mesure d'une petite partie de la qualité de l'air dont la fiabilité n'est pas totalement satisfaisante au regard des normes et dont les prix reflètent l'absence de maturité de ce marché.

L'intérêt des industriels pour l'internet des objets et donc pour les réseaux sans fil, se concentre avant tout sur le potentiel des marchés de masse tels la ville intelligente, la localisation des biens, l'industrie 4.0.

Des réseaux de capteurs simples peuvent néanmoins être constitués à partir de capteurs mesurant des grandeurs physiques avec précision et de passerelles configurables par des ingénieurs ou techniciens suffisamment férus d'informatique. Mais l'étendue de ces mesures, en terme de paramètres, reste limitée, à la fois dans les domaines de l'air, l'eau et les sols.

La deuxième conclusion, qui découle de la première, est la nécessité de faire appel à des sous-traitants internes ou externes pour obtenir un système correspondant à un cahier des charges d'une surveillance environnementale conséquente dans des zones industrielles ou urbaines.

Le choix judicieux du ou des sous-traitants et la négociation du cahier des charges nécessitent un minimum de connaissances auxquels la lecture du présent rapport devrait permettre d'accéder.

L'offre de réseaux de transmission de données commence à se stabiliser suivant 4 directions :

1) les réseaux GSM (2G, 3G, 4G, 5G et LTE et NB IoT) lorsque le débit et la fréquence des envois le nécessitent

- Ces réseaux vont accompagner les développements de l'industrie 4.0, la ville intelligente, la santé intelligente

2) les réseaux LPWAN (Lora ou Sigfox), éventuellement satellitaires en cas de non couverture, lorsque l'autonomie, la longue portée et le bas coût des capteurs sont nécessaires

- Ces réseaux prolifèrent particulièrement dans les applications de localisation des biens, des personnes et des mobiles, qui requièrent une forte autonomie et peu de données transitées. C'est similaire à la problématique du réseau de capteurs environnementaux. Les développements de ces réseaux bénéficieront directement aux réseaux de capteurs.

3) les réseaux locaux WIFI ou Bluetooth, lorsque l'environnement permet des accès internet par box

4) un mix des réseaux précédents lorsque la non-couverture d'une zone et/ou le coût le nécessitent

L'utilisation des réseaux de capteurs environnementaux est aujourd'hui freinée par :

- l'offre limitée de capteurs fiables, bas coût, ou la difficulté de gérer leur dérive dans le temps (difficiles calibrations à effectuer avant et pendant l'utilisation)
- le nombre de molécules différentes à analyser (pesticides, HAP, etc.)
- la cherté des solutions clé en main
- la non universalité des solutions et la difficile interopérabilité entre modules capteurs de différentes marques
- marché de niche qui n'intéresse pas les grosses entreprises de l'analyse (solutions standards domestiques peu fiables ou solutions chères sur mesure faites par des TPE/PME)

Les réseaux de capteurs vont générer des millions de données : les challenges suivants seront à prendre en compte :

- Quid de l'utilisation des données (valorisation de chaque donnée, pour qui, pour quoi ?)
- Implication de Google, Amazon, Microsoft dans les capteurs et les données, risques ou opportunités ?
les réseaux, produits et systèmes de traitement de données de ces big 3 peuvent permettre de faire baisser les coûts des solutions et multiplier leur usage avec le risque que les données domestiques partagées soient de faible qualité et d'un intérêt limité et ne pourront donc pas bénéficier au niveau professionnel (ce qui est en général l'inverse). Le risque d'appropriation des données traitées par leurs plateformes n'est pas négligeable. Il n'est donc pas raisonnable de fonder une stratégie produit industrielles sur leurs plateformes sans avoir de fortes garanties.
- Retour sur investissement (industriels mais aussi public) : l'acquisition et le traitement des données environnementales ne semble pas générer de retour sur investissement sauf dans l'optique de support d'une communication à destination de clients très concernés par l'environnement. (l'état par exemple)
Le traitement des données pour une meilleure connaissance du rapport entre santé et pollution peut éventuellement faire évoluer la facture de l'impact de la pollution sur la santé, estimé (rapport sénatorial de 2015) à 100 milliards d'euros.
- La fouille des données (data mining) est une spécialité émergente qui peut profiter à l'analyse des nombreuses données qui seront issues des réseaux de capteurs. On appelle cette spécialité, il y a peu, l'analyse statistique. L'intelligence artificielle, c'est à dire l'utilisation d'algorithmes sophistiqués, fait partie des outils qui commencent à être utilisés.
En attendant l'avènement de cette spécialité (5 à 10 ans) et des logiciels dédiés, les algorithmes mis à disposition par les plateformes des big 3 ou des sous-traitants suffiront à répondre aux enjeux des traitements de données environnementales pour un coût maîtrisé.

9 Perspectives

Capteurs :

Les capteurs sont le point faible des réseaux de capteurs.

Les mesures physiques (température, niveau d'eau, débits, humidité etc.) sont matures mais ne fournissent que très peu de résultats sur le niveau et la nature des pollutions.

La mesure du taux de particules de l'air et son équivalent pour l'eau, la mesure de la turbidité, sont des mesures simples en apparence, peu chères mais livrent peu d'informations, si ce n'est un niveau global de pollution. Le couplage du comptage de particules avec une analyse de la nature et la composition des particules serait bénéfique à la détermination du lien entre santé et pollution. Des recherches actives au niveau universitaire et industriel devraient être encouragées dans cette optique.

Les capteurs basés sur l'électrochimie (aussi bien micro que macro capteurs) ne parviennent et ne parviendront pas à gagner en fiabilité sur la durée ni en autonomie, les réactions chimiques étant souvent irréversibles. Ils nécessitent une maintenance non compatible avec une mise en réseau.

Une intense veille technologique sur les nouvelles méthodes de détection des espèces chimiques par voies spectroscopiques (dans toutes les gammes de longueur d'onde, UV, visible, IR, térahertz) ou opto-acoustique (SPR, SAW) doit être entreprise ou maintenue.

Des solutions **d'électrophorèses capillaires ou de micro chromatographie** gazeuse, existantes, mériteraient des développements industriels conséquents pour les rendre accessibles en production de masse. Mais les marchés de l'analyse, que la réglementation ne tire pas, ne sont certainement pas encore assez attractifs pour intéresser des investisseurs.

Les **capteurs MOS à couche fonctionnalisée ou MOx à profil de température** similaire à une stratégie de voltampérométrie seront difficiles à mettre au point de manière totalement fiable.

Les **nanocapteurs** en sont à leur début et pourraient permettre de combler un vide, à terme, puisqu'on travaille à la même échelle que les substances à analyser. Tout en sachant que les dispositifs, invisibles à l'œil et au microscope optique, sont d'autant plus compliqués à appréhender.

Les analyses par **spectrométrie d'absorption** à différentes longueurs d'onde restent les solutions prometteuses à plus brève échéance pour peu que des lasers aux longueurs d'ondes dans l'infrarouge moyen deviennent disponibles à bas coût comme c'est le cas pour le CO₂, ou dans l'UVC pour d'autres molécules (ex : nitrates, phosphore, fer)

Réseaux de télécommunications :

Le réseau LORA pourrait encore d'évoluer vers des solutions clés en main plus universelles, à la fois au niveau matériel et logiciel incluant non plus uniquement la gestion des équipements mais aussi le traitement des données. On ne peut qu'espérer des opérateurs ce surcroît d'intelligence dans les réseaux. Ou les inciter à œuvrer dans ce sens.

- La couverture par des passerelles universitaires et privées, réseaux collaboratifs, devrait se développer pour assurer une connectivité gratuite sur les territoires, à réserver à des applications non sensibles.

Le réseau SIGFOX est à surveiller puisqu'il faut s'attendre à des restructurations à la fois dans la société SIGFOX et dans le réseau physique et logiciel : Le réseau physique (les relais antennes) pourrait être vendu de manière découpée et le réseau logiciel (le cloud) repris par un tiers en cas de défaillance de la société SIGFOX. Les investisseurs, souvent clients de SIGFOX ont intérêt à faire en sorte que la solution SIGFOX perdure, c'est peut-être là un gage sérieux de pérennité.

Le réseau NB-IoT souffre encore en France d'être dépendant d'un seul opérateur, SFR et de sa faible couverture en surface (environ 50%). Il a cependant des possibilités de progression grâce à son débit plus élevé que LORA et son niveau de sécurité accru.

Les réseaux GSM M2M verront l'avènement de la 5G d'ici 5 ans, qui bénéficiera principalement à l'industrie 4.0 et au transfert de fichiers volumineux. Les réseaux de capteurs n'étant pas la cible de la 5G, il faudra s'assurer, si on choisit une solution GSM M2M que l'on pourra s'adapter au passage de la 4G vers 5G sans avoir à changer son matériel, par exemple sous forme d'une simple modification de logiciel.

Les réseaux satellitaires, en cours de déploiement, vont certainement compléter avantageusement l'offre en réseaux d'ici 3 à 5 ans, le temps que toutes les constellations deviennent opérationnelles. Certaines, spécifiques IoT, sont à surveiller de près. Espérons que le marché sera au rendez-vous et que la concurrence accrue ne soit pas une source d'inquiétude supplémentaire accompagnant les choix dans tout nouveau projet. Il faudra rester prudent vis-à-vis des promesses.

Traitement des données :

Dans la profusion des logiciels de programmation des capteurs, passerelles, routeur, site internet, il est difficile d'anticiper l'apparition de solutions clé en main, simples d'utilisation sans connaissance informatiques poussées. La dépendance vis-à-vis des experts risque de durer.

Des sites de sous-traitance informatique proposant des experts freelances de toutes nationalités sont nombreux et les résultats à en attendre difficilement appréhendables et donc hasardeux. D'autant plus qu'il y a très peu d'experts universels pouvant prendre en compte l'ensemble de la chaîne constitutive d'un réseau de capteurs. Un expert Android n'aura pas forcément les compétences IoT.

Le développement d'une plateforme universelle, simple d'utilisation, configurable par n'importe qui, avec une possibilité de traitement des données de type tableur serait idéal. Mais cette plateforme doit être développée de manière open source (logiciel libre) pour être enrichie par les amateurs éclairés du monde entier. De manière identique à l'écosystème autour de linux et la raspberry ou arduino. Des tentatives universitaires ont été essayées sans grand succès.

Un mécénat de grosses sociétés ou une mutualisation de moyen de développement par les dites grosses sociétés pour aboutir à une telle solution serait d'une intelligence collective telle qu'on peut en rencontrer dans l'aéronautique et le spatial.

10 Les sources d'informations concernant les réseaux

Ci-après une liste de sources bibliographiques, les plus pertinentes, trouvées sur internet ou envoyées par les sociétés

Une simple recherche dans votre moteur de recherche favori vous permettra de les consulter aisément.

sources	titre du document	date du document
yole developpement	Internet of Things: A Promising Future for Sensors	February 17, 2017
JDN (journal du numerique)	<p>Smart city : quel réseau IoT choisir pour quel service</p> <p>Plateforme IoT _ définition, comparatif, device management</p> <p>L'IoT, nouvelle frontière du machine learning</p> <p>Wize, le standard IoT qui transperce les murs et sous-sols</p> <p>Gateway _ définition et rôle dans l'IoT</p> <p>Wize _ le protocole né dans l'énergie</p> <p>Le rennais Nemeus porte le protocole IP over LoRaWAN d'Acklio sur ses modules radio bimodes LoRa_Sigfox – L'Embarqué</p> <p>Effervescence autour de la bande des 450 MHz pour les applications de communication M2M et de l'Internet des objets – L'Embarqué</p> <p>_10 conseils pour gérer l'explosion à venir de l'Internet des objets_ – L'Embarqué</p> <p>Nouveau record pour une transmission de données sans fil LoRaWAN _ 832 km ! – L'Embarqué</p> <p>White paper _ découvrez les standards 5G New Radio de A jusqu'à Z – L'Embarqué</p> <p>L'Industrial Internet Consortium compile les meilleures pratiques pour développer et déployer des solutions IIoT – L'Embarqué</p> <p>L'australien Myriota lève près de 20 M\$ pour déployer son Internet des objets par nanosatellites – L'Embarqué</p> <p>Sécurité de l'IoT _ Thales, Telstra, Microsoft et Arduino s'alignent ensemble sur la spécification IoT-SAFE – L'Embarqué</p> <p>OneWeb lève 1,25 milliard de dollars supplémentaires pour lancer sa constellation de 650 satellites d'ici à 2021 – L'Embarqué</p> <p>Nanosatellites et Internet des objets _ un duo (peut-être) promis au septième ciel – L'Embarqué</p> <p>Le marché des satellites au poids inférieur à 500 kg va quadrupler sur la prochaine décennie – L'Embarqué</p> <p>Farnell lance la seconde édition de son enquête mondiale sur les développements de l'Internet des objets – L'Embarqué</p> <p>White paper _ IoT industriel _ libérer les services à forte valeur ajoutée grâce à la connexion des actifs – L'Embarqué</p> <p>L'industrie automobile sera en 2023 le plus gros marché de la 5G appliquée à l'Internet des objets – L'Embarqué</p> <p>Fin 2023 143,5 millions de maisons en Europe et en Amérique du Nord seront _intelligentes_ – L'Embarqué</p> <p>Les technologies LPWAN NB-IoT et LTE-M s'arrogeront 52% des connexions cellulaires IoT en 2025 – L'Embarqué</p> <p>Ce qui n'arrivera pas en 2020 _ la consolidation du marché des plates-formes IoT – L'Embarqué</p> <p>30 millions de luminaires urbains intelligents seront déployés dans le monde en 2023 – L'Embarqué</p> <p>Bluetooth pour les objets connectés _ un marché qui va presque quadrupler d'ici à 2024 – L'Embarqué</p>	28/01/2020

	Il se vendra 8 millions de passerelles IoT cellulaires en 2023, estime Berg Insight – L'Embarqué Selon Cisco, 45% des équipements connectés le seront à un réseau mobile 2G, 3G, 4G, 5G ou LPWAN en 2023 – L'Embarqué	
laas	Wireless communication platform for active sensors networks	
cap'tronic	prendre le virage des objets connectés	2015
note élargie (Assemblée nationale)	LES OBJETS CONNECTÉS	22/03/2018
RTONE IOT MAKERS	Quel réseau choisir pour mon objet connecté ? -	20/02/2020
	Cloud Computing VS Edge Computing : quelle architecture réseau choisir pour mon objet connecté ?	05/03/2020
	IoT : les avantages d'une Gateway sur-mesure	02/04/2020
IOT world today	5G in IoT Starts to Crystallize in Industrial IoT market	19/02/2020
documentation texas instruments	MIOTY, the new LPWAN standard, provides quality and scalability for worldwide Sub-1 GHz communication	2020
ETSI	ETSI LAUNCHES NEW GROUP ON NON-IP NETWORKING ADDRESSING 5G NEW SERVICES	07/04/2020
électroniques.biz	OMNISPACE CHOISIT THALES ALENIA SPACE POUR	14/04/2020
	DÉVELOPPER L'INFRASTRUCTURE SATELLITAIRE D'UN RÉSEAU HYBRIDE MONDIAL	
	TELENOR, SONY ET ERICSSON VONT DÉVELOPPER DES	14/04/2020
	APPAREILS DE SANTÉ INTELLIGENTS IOT	
usine-digitale.fr	La start-up loTerop a conçu une surcouche logicielle pour sécuriser les objets connectés	mars-20
Institut Montaigne	L'Europe et la 5G :passons la cinquième !	
lemagit.fr	IoT : les services cloud dédiés d'AWS, Microsoft et Google	fevrier 2020
laboratoires LS2N et IETR	Synthèse sur les protocoles de communication pour l'Internet des objets de l'industrie 4.0	janv-19
Ecole des Ponts Paristech	L'Appropriation de l'internet des objets par les collectivités territoriales	janv-19
OECD DIGITAL ECONOMY papers	IOT MEASUREMENT AND APPLICATIONS	oct-18
techtarget	2020 IT Priorities	fevrier 2020
IOTEROP webinar slides	Welcome to NB IoT: Ready for Mass Market	2020
these Université Clermont Auvergne	Study and improvement of long range communication technologies for wireless sensor networks	12/09/2020
these université de Lorraine	Conception d'un système de communication sans fil industriel basé sur la transformée en ondelettes	23/10/2019
these INSA LYON CITILAB	Deployment and Scheduling of Wireless Sensor Networks for Air Pollution monitoring	12/03/2019
université de Brescia Italie / rio grande Bresil	On the Use of LoRaWAN for the Monitoring and Control of Distributed Energy Resources in a campus	01/01/2020
Carnegie Mellon University	Empowering Low-Power Wide Area Networks in Urban Seings	2017

ghent university (IJCE, Vol. 4, No. 1 (2018))	Application of LoRaWAN for Smart Metering: An Experimental Verification	2018
documentation de ORANGE BUSINESS SERVICES	Presentation_Client_lot_Connect_Low_Power_juillet_2020 L'essentiel_Live_Objects_avril_2019 PC_gamme_M2M_IoT_juillet_2018_V3	2020
documentation SIGFOX	Presentation_technique_de_Sigfox_Juillet_2017	2020
documentation microchip (exemple)	SAM R34/R35 Low Power LoRa® Sub-GHz SiP Datasheet	
documentation de texas instruments (exemples)	CC1310 SimpleLink™ Ultra-Low-Power Sub-1 GHz Wireless MCU Sub 1-GHz Sensor to Cloud Industrial IOT Gateway Reference Design Application Note (AWS service)	2019
documentation cisco (exemples)	Copenhagen Drives City Carbon Footprint Reductions and Enriches Citizen Experiences through Converged Digital Solutions Announcing Cisco Kinetic for Cities: New name, alignment and evolution for Smart+Connected Digital Platform	avr-19 19/02/2020
rapport d'etude des membres du CVT AllEnvi et BRGM IRSTEA	réseaux de capteurs sans fil : surveillance agricole et surveillance environnementale Comprendre la technologie LoRa et déployer son propre réseau de données LoRaWAN pour l'Internet des Objets	2017
IOT factory		août-19
IDC (sponsorisé IBM)	La création d'applications cloud natives dans un univers de multicloud hybride	avr-20
cabinet WAVESTONE ,Etude-Agrion-IOT	L' I o T INDUSTRIEL DU P o C À L'INDUST R I A L I SATION	2017

WIZE alliance	WIZE Alliance Presentation EN june 2019 DIFF	juin-19
articles extraits de sciencedirect.com	<p>Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications</p> <p>Antenna design for a massive multiple input environmental sensor network</p> <p>Wireless self-powered sensor networks driven by triboelectric nanogenerator for in-situ real time survey of environmental monitoring</p> <p>Cloud based sensor network for environmental monitoring</p> <p>Real-Time Microservices Based Environmental Sensors System for Hazmat Transportation Networks Monitoring</p> <p>Design aspects of acoustic sensor networks for environmental noise monitoring</p> <p>Low-dimensional carbon based sensors and sensing network for wearable health and environmental monitoring</p> <p>Open source REST services for environmental sensor networking</p> <p>Correlation analysis and statistical characterization of heterogeneous sensor data in environmental sensor networks</p> <p>Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines_ A systematic review</p> <p>Wireless Sensor Network for Environmental Monitoring with 3G Connectivity</p> <p>Innovations in Monitoring With Water-Quality Sensors With Case Studies on Floods, Hurricanes, and Harmful Algal Blooms</p>	
documentation SFR	<p>iot_connect_nb-iot_-_conditions_tarifaires_grille_iot_standard_-_fra_202...</p> <p>Présentation IoTConnect</p>	<p>2020</p> <p>2020</p>
documents Sierra Wireless	<p>IIoT Panel: Enabling Interoperability Between the Edge and the Cloud</p> <p>Bridging the IT-OT gap in your Industrial IoT project</p> <p>Airlink_datasheet_MP70</p>	<p>2020</p> <p>2020</p> <p>2020</p>
document VODAPHONE	WEBINAIRE NB-IoT vs LTE-M Profils comparatifs et usages	2020
IRJCS/RS/Vol.04/Issue10/OCCS10084	Lorawan INDOOR PERFORMANCE ANALYSIS	2017

11 ANNEXES

11.1 Les Réseaux de transmission de données

La définition générale d'un réseau est un ensemble d'entités reliées entre elles

On utilise le mot réseau pour désigner différents niveaux ou objets :

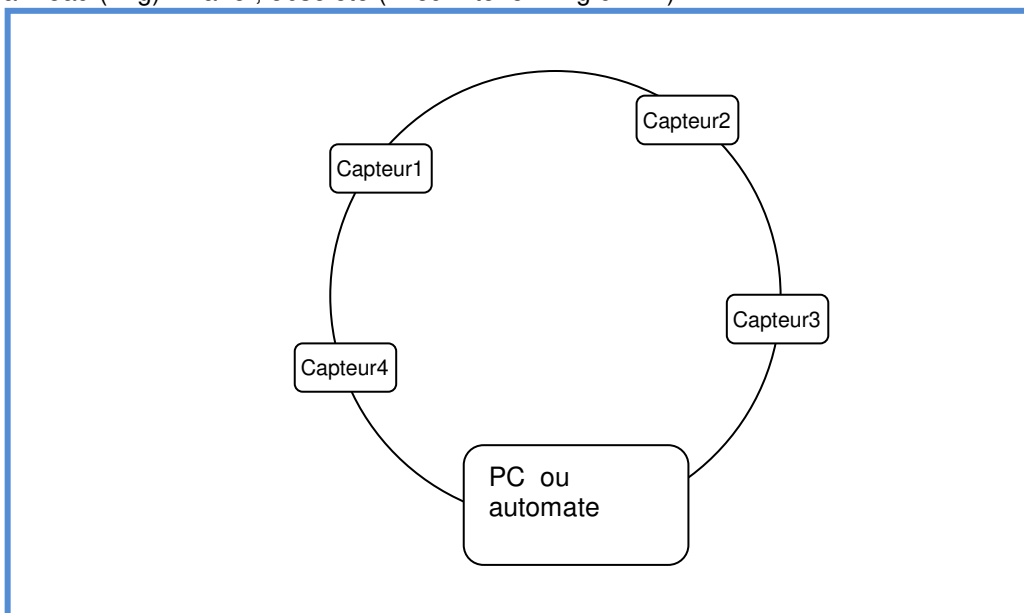
- Les systèmes physiques (ex : réseaux de relais de France Télécom)
- Les systèmes complets (ex : réseau internet, réseau Sigfox)
- Les systèmes de transmission (ex : wifi, bluetooth)

Nous appellerons « réseaux de capteurs » un réseau dont une extrémité est un ensemble de capteurs et l'autre extrémité le système de présentation des données (ordinateur, smartphone, tablette) issues des capteurs à un utilisateur,

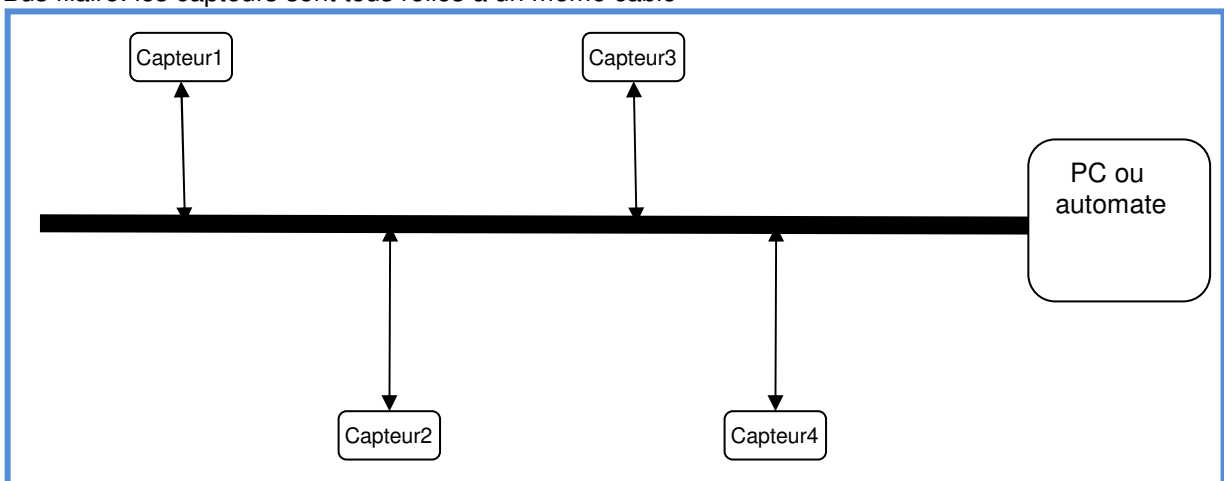
11.1.1 La topologie des réseaux

L'architecture des réseaux peut prendre diverses formes :

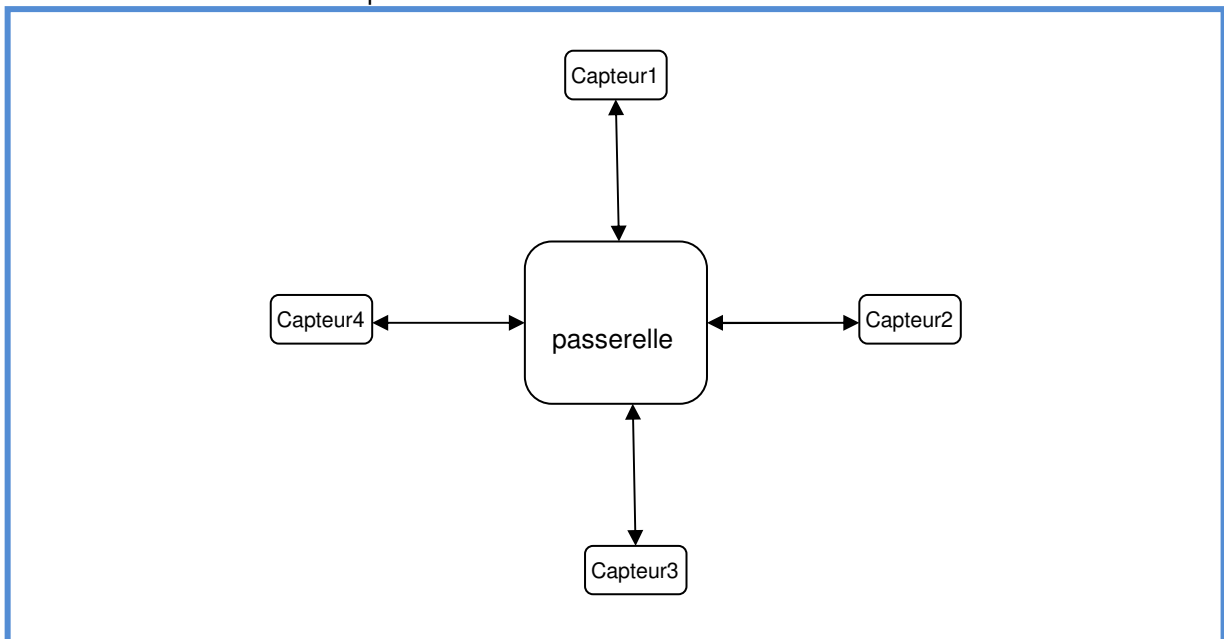
anneau (ring) : filaire , obsolete ("vieux" token ring d'IBM)



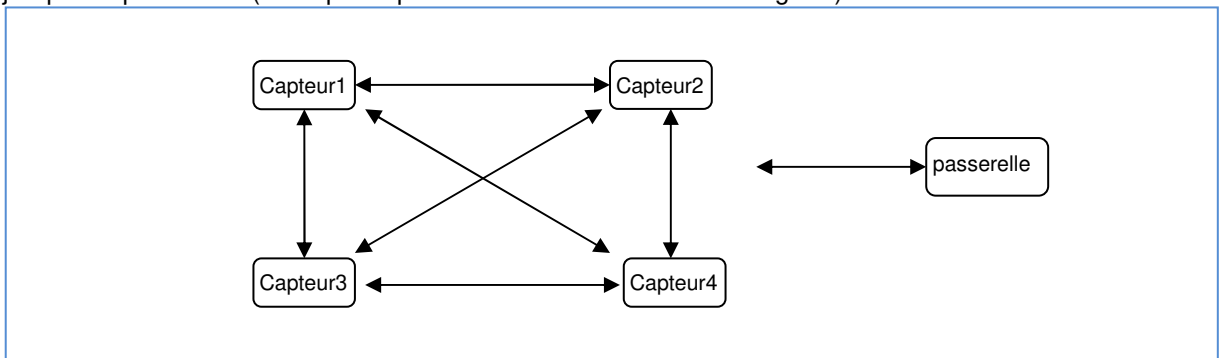
Bus filaire: les capteurs sont tous reliés à un même câble



Étoile (star) : les capteurs communiquent avec une passerelle , c'est la configuration la plus répandue dans les réseaux sans fil de capteurs



Maillé (mesh) : les capteurs sont tous reliés entre eux, les signaux prennent le chemin le plus efficace jusqu'à la passerelle (exemple le plus connu : le réseau sans fil zigbee)



Les réseaux sans fils sont essentiellement des réseaux étoiles (un concentrateur/passerelle) ou étoile étendu (chaque nœud d'un réseau l'étoile peut être nœud d'un autre réseau étoile).

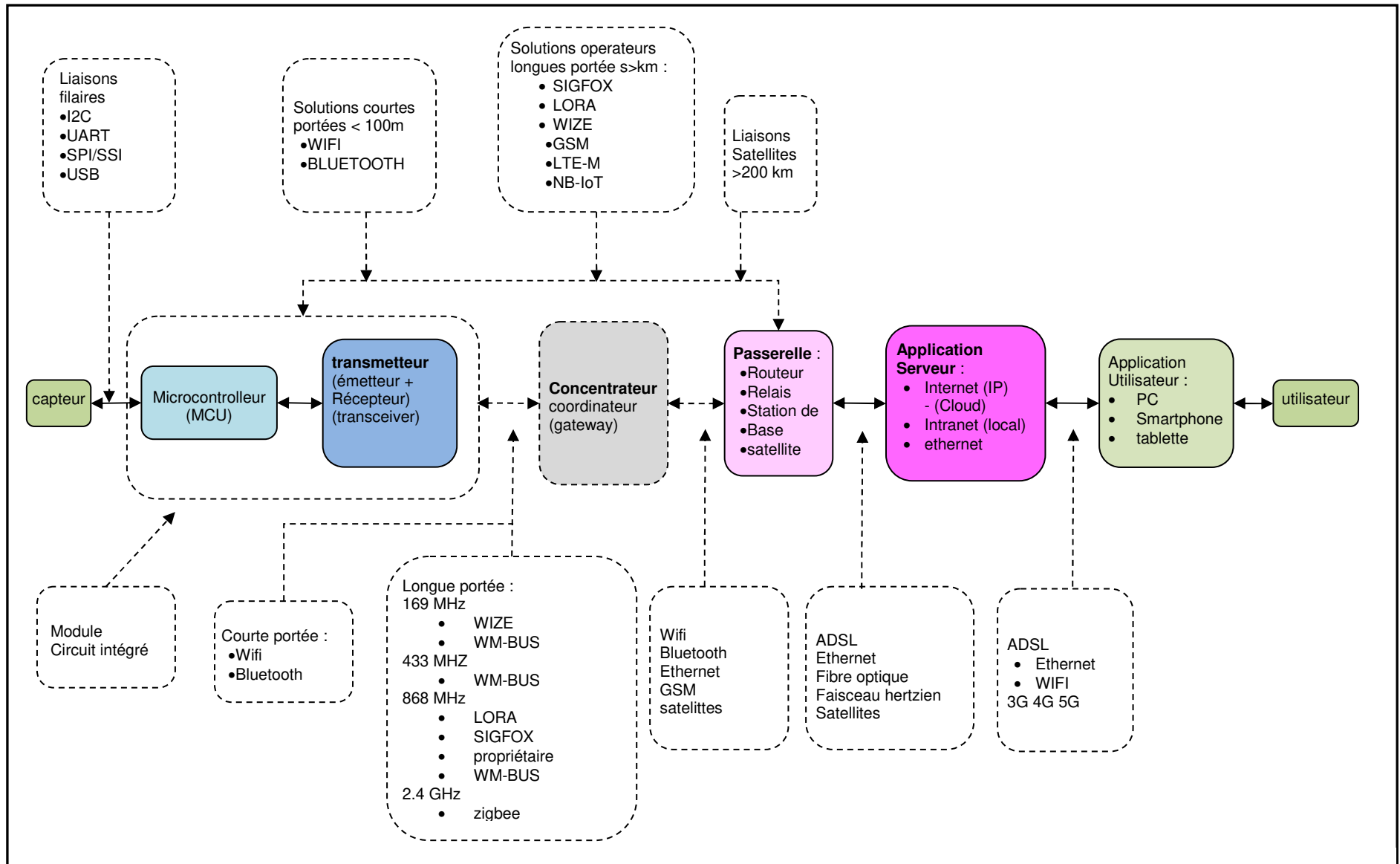
Les réseaux filaires sont généralement constitués de bus bi ou trifilaires.

11.1.2 Schéma de principe générique d'un réseau sans fil de capteurs

Le schéma de principe qui suit permet de comprendre la complexité des options lorsque l'on veut concevoir un réseau de capteurs sans fil.

Plusieurs solutions permettent d'arriver à un même résultat mais le coût, la rapidité de mise en place et la pérennité peuvent être très différents selon les options choisies.

Figure 15 schéma générique d'un réseau de capteurs



o

11.1.3 Les différents réseaux sans fil disponibles

Les réseaux sans fils se définissent par des protocoles (logiciels) de communication entre les équipements (les capteurs par exemple) et les récepteurs qui sont connectés à un autre réseau de traitement de données (soit local soit externe comme internet)

Les protocoles sont insérés d'une part dans les microcontrôleurs des modules capteurs comprenant l'émetteur/récepteur des données et dans tous les autres éléments constituant le réseau.

11.1.3.1 Les réseaux GSM (téléphonie mobile)

Les téléphones mobiles cellulaires sont basés sur le réseau GSM (« groupe spécial mobile » devenu « global system for mobile communication »)

L'accès aux réseaux GSM se fait grâce à des cartes SIM qui constituent une identification forte et sécurisée. Un abonnement ou un forfait est lié à chaque carte SIM.

La France compte plus de 70 millions d'abonnements au réseau GSM

Ce réseau est initialement dédié à la transmission de la parole. Il utilise 6 gammes de fréquences : 700, 800, 900 (3G), 1800, 2100, 2600 MHz. 4 opérateurs se partagent les bandes de fréquence

Il est constitué d'un maillage du territoire par des relais (appelés aussi stations de base) GSM

Exemple : avec 19 683 relais, Orange couvre la France avec l'équivalent d'un relais par carré de 5km de coté

Tableau 11 le nombre d'antennes GSM en France par opérateurs

Relais 4G au 1er aout 2019	700 MHz	800 MHz	2100 MHz	2600 MHz	1800 MHz	TOTAL 4G
ORANGE	2347	21152	11301	10418	16714	23223
SFR	595	19571	6797	7615	12746	20182
BOUYGUES TÉLECOM	1884	18587	3638	6310	12267	19308
Free Mobile	16506	0	0	14998	15471	17348
total						80061

Source ANFR 2019

Les réseaux GSM sont entièrement gérés par ces opérateurs ce qui leur confère la pérennité et la fiabilité associées, relativement bien connues du public.

La sécurité des transmissions est assurée par la sécurisation des cartes SIM.

Cette sécurisation n'est malgré tout pas sans faille.

Une bande de fréquence est utilisé pour les données « montantes » allant du téléphone vers le relais (upload) et une autre pour les données « descendantes » allant du relais vers le téléphone (download).

Certains téléphones peuvent fonctionner dans plusieurs bandes (900 et 1800 MHz), mais tous ne fonctionnent pas sur la bande 700 MHz par exemple.

Un réseau privé GSM-R est réservé pour les applications ferroviaires (SNCF et eurotunnel).

L'organisation 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) a fait évoluer la norme GSM de départ pour prendre en charge de plus hauts débits et **le transport de données en mode « paquet »** par les extensions **GPRS** (General Packet Radio Services) puis **EDGE** (Enhanced Data rates for GSM Evolution). Ces deux modes peuvent cohabiter avec le mode « voix commutée » du GSM et utilisent les mêmes antennes et les mêmes bandes de fréquence.

Puis les réseaux GSM sont passés à une connexion internet utilisable via 2 applications finales utilisateur ANDROID ou iOS (iphone operating system de APPLE) (l'équivalent téléphone mobile de Microsoft Windows ou de MacOS d'Apple pour les ordinateurs)

Des codages radio particuliers sont utilisés pour permettre l'accès à de multiples équipements (stations mobiles de types téléphones portables, capteurs) par relais (**stations de base**). On parle de OFDM, OFDMA, SC-FDMA.

Les réseaux mobiles GPRS (General Packet Radio Service) :

Prolongement de la norme GSM, le réseau GPRS permet un débit de données allant de 40 Kbit/s à un maximum théorique de 171 Kbit/s. Elle transmet les données par paquet en empruntant simultanément plusieurs canaux GSM. **Le réseau GPRS correspond à la génération dite 2,5G ou 2G+.**

Ce réseau ne doit pas être utilisé pour de nouveaux développements.

Les réseaux mobiles EDGE (Enhanced Data Rates for GSM)

Cette norme encode les données de manière plus efficace que le GPRS et permet d'atteindre un débit maximal de 384 Kbit/s pour une moyenne de 100 Kbit/s. **EDGE correspond à la génération dite 2,75G.**

Ce réseau ne doit pas être utilisé pour de nouveaux développements.

La technologie mobile 3G, 3G+, H+ et Dual Carrier

3G : Apparue au début des années 2000, la **téléphonie mobile** de troisième génération (ou 3G) a été mise en place suivant la norme UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), ce qui a nécessité le déploiement d'un nouveau réseau physique. Les données transmises en 3G ont un débit plafond de 2 Mbit/s, mais en pratique il s'élève plutôt à 384 Kbit/s.

La **3G+** (ou H pour **HSPA** High speed Packet access) est une version améliorée de la **3G** : elle permet de surfer sur Internet à un débit maximum de 14,4 Mbit/s (3,6 Mbit/s en pratique).

Grâce à la H+ (ou HSPA+), la connexion à Internet est encore plus rapide : jusqu'à 21 Mbit/s (5 Mbit/s en pratique).

Et en doublant la connexion, on obtient un débit maximum de 42 Mbit/s, c'est le principe du DC-HSPA+ ou Dual Carrier.

Peut servir à transmettre des données (via des structures de type site internet) **mais le cout de l'abonnement est peu intéressant par rapport aux réseaux dédiés IoT**

Le réseau mobile 4G, la 4G+ et la 4G++

La 4G est le réseau mobile de 4ème génération. Elle permet de bénéficier d'un débit théorique maximum de 150Mbit/s, comparable au débit de l'ADSL. En pratique, le débit est plutôt de 40 Mbit/s.

Le réseau 4G+ (ou 4G LTE Advanced) et la 4G++ (ou 4G+ UHD) sont des évolutions de la 4G, elles permettent respectivement de surfer 2 et 3 fois plus vite qu'en 4G.

Peut servir à transmettre des données (via des structures de type site internet) mais le cout de l'abonnement est peu intéressant par rapport aux réseaux dédiés IoT (quelques dizaines d'euros par mois par carte Sim 4G comparé à moins d'un euro par module capteur/émetteur pour LORA ou SIGFOX). Des offres, proportionnelles à la quantité de données traitées, peuvent être éventuellement compétitives (ex : SFR business).

La LTE-M (long term evolution for machines) versus NB-IOT (narrow band IOT)

Ces 2 réseaux ont été définis par la 3GPP (3eme Generation Partnership Project, qui est une coopération entre organismes de normalisation en télécommunications tels que : l'UIT, l'ETSI, l'ARIB/TTC, le CCSA, l'ATIS et le TTA, qui produit et publie les spécifications techniques pour les réseaux mobiles de 3^e et 4^e générations)

	NB-IOT	LTE-M
portée	1.5km en urbain 20km en rural Passe 2 murs	1km en urbain 10km en rural Passe 1 mur
autonomie	10 ans	5 ans
Nombres de capteurs /antenne	>100 000	>100 000
débits	<200kbit/s	<1 Mbit/s
Bidirectionnel	oui	oui
Carte SIM	Oui	oui
latence	seconde	millisecondes

Figure 16 comparaison LTE-M vs NB-IOT

Le LTE-M (Long-Term Evolution for Machines) a été conçu pour l'loT (Internet of Things).

Ce réseau utilise les réseaux 4G existants et fonctionne sur les fréquences basses (en France entre 700 et 800 MHz) et grâce au protocole CAT-M1 qui permet d'améliorer l'accessibilité de tous les objets connectés.

Le LTE-M optimise également la consommation énergétique de ses objets grâce à la mise en veille (Power Saving Mode). C'est aussi une solution sécurisée puisqu'elle utilise l'authentification des cartes SIM. Chaque opérateur utilise une bande de fréquence dédiée.

Les réseaux mobiles LTE sont commercialisés sous l'appellation « 4G » par les opérateurs de nombreux pays,

Il est prévu que LTE-M soit compatible avec la 5G mais il faudra veiller à ce que les dispositifs connectés soient munis de transmetteurs aptes à fonctionner aux fréquences de la 5G 3.6GHz et supérieur.

Le LTE utilise des bandes de fréquences d'une largeur pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz dans une plage de fréquences allant de 450 MHz à 3,8 GHz selon les pays. Il permet d'atteindre (pour une largeur de bande de 20 MHz) un débit binaire théorique de 300 Mbit/s en « liaison descendante » (*downlink*, vers le mobile). La « vraie » 4G, appelée *LTE Advanced* offrira un débit descendant pouvant atteindre ou dépasser 1 Gbits/s ; ce débit nécessitera l'utilisation de bandes de fréquences agrégées de 2x100 MHz de largeur qui sont définies dans les versions 10 à 15 (3GPP releases 10, 11, 12, 13, 14 et 15) des normes *LTE Advanced*

Les opérateurs proposant un accès réseau LTE-M :

Les offres des opérateurs se ressemblent :

A la fois intégrateurs de solutions complètes, opérateurs télécom et fournisseurs de cloud, traitement de données et gestion de la flotte de devices (capteurs, modules, passerelles)

Ils se proposent de vous aider pour la mise en place et la maintenance du réseau.

Certains éléments de l'ensemble sont néanmoins sous traités à des partenaires.

ORANGE business services :

Propose l'accès à 2G/3G/4G LTE-M (ainsi qu'à LORA voir plus loin au chapitre LORA)

Orange agit à la fois en tant qu'intégrateur, opérateur et fournisseur de terminaux mobiles.

- **Cout de l'accès au réseau LTE-M (offre M2M/IoT IoT Connect) : 10.5 € à 13.5€ par mois** suivant la quantité de données
- Offre logiciel : Live Objects, plateforme multi protocoles sécurisée pour gérer les objets et données : 3 offres (de 5€ à 25€/mois), Compatible avec LORA, IP, 2, 3 et 4G LTE-M NB IoT

Orange ne propose pas d'accès réseau NB-IoT, qui ferait concurrence avec LORA.

La couverture du territoire français : [site](#) (30 000 communes et 95% de la population)

La slide suivante d'Orange business services exprime toute la complexité d'un réseau M2M/IoT qui fait appel à de multiples compétences et promeut l'intérêt de passer par un acteur qui maîtrise le plus d'éléments de la chaîne de valeur.

Functional Overview & Value proposition

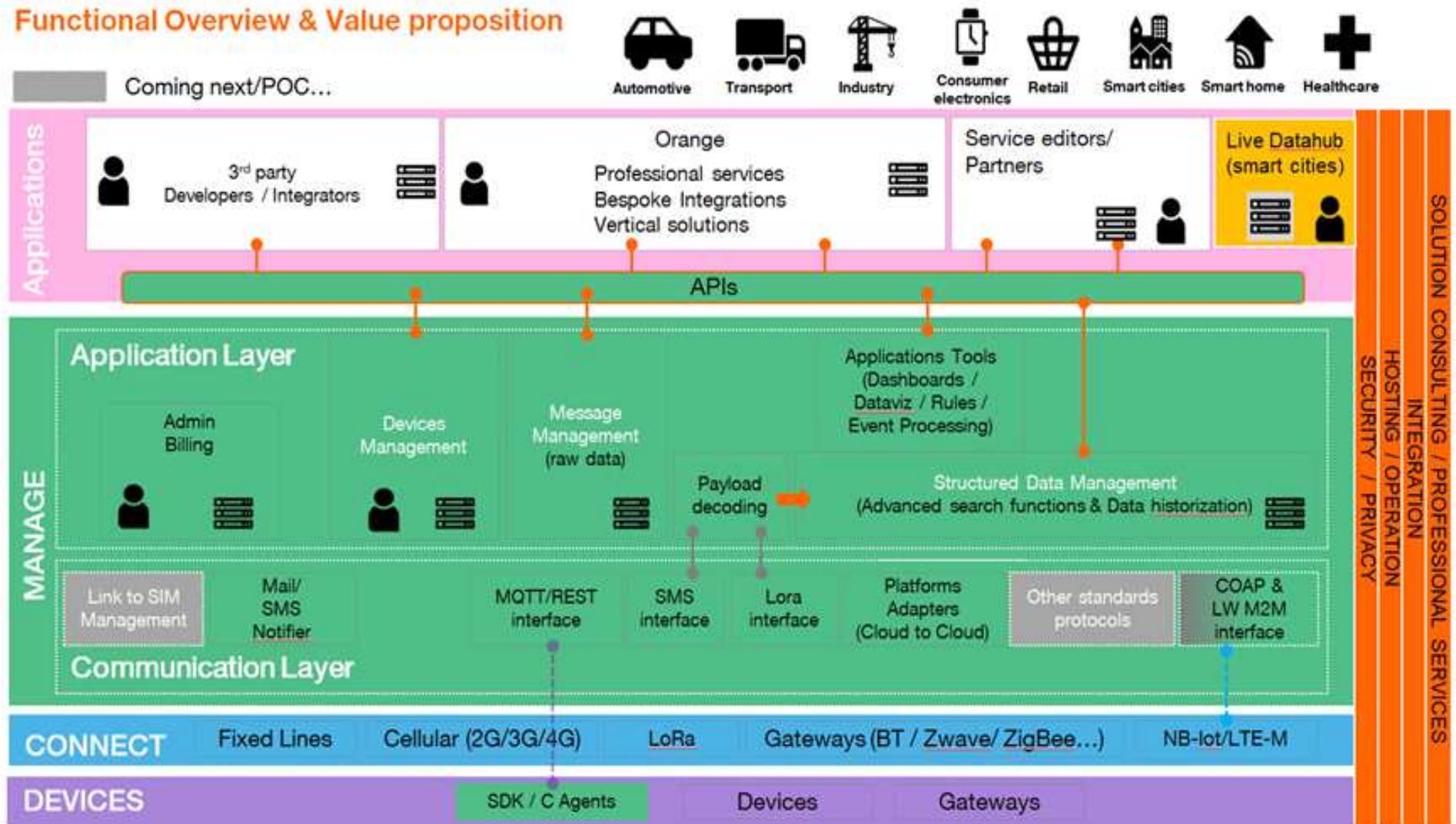


Figure 17 documentation Orange business services

OBJENIOUS (BOUYGUES TÉLECOM)

Figure 18 réseau , document Objenious



SFR :

SFR propose une connexion 2G/3G/4G sans l'appellation LTE-M avec des couts mensuels dépendant du trafic de données

	500 Koctets	50 Mcoctets	10 Goctets
Cout mensuel	2.6 €	4 €	28 €

Délai de mise en place du réseau (hors développement/interfaçage des capteurs) : environ 3 mois

Le NB-IOT :

C'est un réseau basé sur les relais 4G, prêt pour la 5G

Très répandu dans l'est de l'Europe.

C'est une bonne alternative aux réseaux SIGFOX et LORA, plus sécurisé, qui permet une bonne autonomie. Le temps de latence de quelques secondes n'est pas gênant pour des réseaux de remontée de données capteurs.

Seul SFR business propose ce réseau en France, les 2 autres opérateurs ayant misé sur LORA ou le LTE-M (plus industriel du fait de sa faible latence).

	500 Koctets	50 Mcoctets	10 Goctets
Cout mensuel	0.85 €	1.5 €	

Il faut rajouter le cout des cartes SIM (4 à 6 euros suivant quantité)

Délai de mise en place du réseau (hors développement/interfaçage des capteurs) : environ 3 mois

Couverture : 20 000 antennes 4G couvrent la France en septembre 2020 (en comparaison Orange 23000 et Bouygues 19300)

Les fabricants de Modem (modules) NB-IOT/LTE :

Nordic	U-blox	DIGI	Nimbelink
--------	--------	------	-----------

Prix :

- les modules transmetteurs LTE-M /NB-IOT coutent entre 15 et 20€
- les modems (microcontrôleur + modules RF) coutent environ 60€

Par comparaison, un module (équivalent au modem LTE-M) LORA ou SIGFOX coute 5€ (minimum)

La qualité de service est supposée meilleure que le réseau LPWAN basés sur la bande de fréquences ISM libres (LORA SIGFOX etc.) puisque les bandes de fréquence sont privées et donc moins sujettes à interférences avec d'autres utilisateurs.

Le réseau 5G :

Alors que tout le monde n'est pas encore passé à la 4G, les constructeurs de Smartphones et les opérateurs mobiles travaillent déjà à la prochaine génération : le réseau 5G.

- Le débit théorique de la 5G pourrait atteindre les 50 Gbits/s (transfert de plus de 10 films en 1 seconde)
- Permettrait la connexion de 1 millions d'équipements par km² (grâce, entre autres, à des antennes intelligentes directionnelles MIMO)

L'attribution des fréquences (en France 3.4 à 3.8GHz) est prévue Les 4 opérateurs français (Orange Bouygues Telecom, Free SFR) ont déposé une demande en février 2020 (chacun obtiendra une bande de 50 MHz) une mise aux enchères de 11 blocks supplémentaires de 10MHz va bientôt être organisée.

En 2026 il est prévu d'utiliser aussi la bande 24.25 à 27.5 GHz dont la hauteur fréquence permettra un débit beaucoup plus important

Les bandes 700 MHz et 1.5MHz sont aussi mentionnées mais leur attribution n'est pas actée.

Le calendrier de déploiement de la 5G en France :

- 2019 expérimentations (464 antennes déjà en service) des services dont l'IoT
- 2020 : 5 à 10 grandes villes desservies
- 2/3 de la population couverte en 2025
- 100% en 2030

Il n'est donc peut-être pas judicieux de baser des réseaux de capteurs dans un avenir proche (moins de 5 ans) sur la 5G, sauf à visée expérimentale, le très haut débit n'étant pas nécessaire pour les capteurs environnementaux.

11.1.3.2 Les reseaux longue portée LPWAN (low power wide area network)

Ces réseaux assurent les transmissions de données et de consignes dans :

- La ville intelligente (éclairage, pollution, gestion places de parking, surveillance etc.
- La maison intelligente (chauffage, énergie alarmes, etc.)
- L'industrie (surveillance des équipements, maintenance préventive, etc.
- L'agriculture connectée (suivi du bétail, paramètres environnementaux
- Surveillance environnementale (urbaine, industrielle, nature et rurale)
- La santé (suivi des malades, des équipements)

Les capteurs utilisant les réseaux LPWAN bénéficient de portées de plusieurs kilomètres voire dizaines de kilomètres. Les passerelles/concentrateurs auxquels ils se connectent sont en général reliés au réseau mondial internet. Elles peuvent aussi être connectées à un réseau informatique local sans connexion externe sur le WEB (réseau intranet) ce qui permet une sécurité accrue.

Nota bene : Les réseaux LTE-M et NB-IoT sont aussi des réseaux LPWAN mais dépendant des réseaux GSM, ils ont été décrits dans ce chapitre précédent

Le marché des réseaux LPWAN se résume aujourd'hui principalement aux réseaux généralistes suivants :

- LORA
- SIGFOX
- LTE-M
- NB-IOT

De nombreux articles de presse ou promotionnels présentent des analyses comparatives LORA versus SIGFOX et LTE-M versus NB-IoT

D'autres réseaux sont plus spécialisés et motivés par des considérations commerciales plutôt que technologiques : volonté de se démarquer ou se différencier de la concurrence.

Les principaux :

- WIZE : compteurs
- Z-WAVE : domotique
- Thread : domotique
- KNX : bâtiment

11.1.3.2.1 LORA®/LORAWAN

Le réseau LORA, dont l'alliance LORAWAN (Long Range wide area network) est à l'origine, a été créé par une société grenobloise Cycleo que Semtech, fabricant de puces, a racheté en 2012. Orange et Bouygues Télécom sont particulièrement actifs dans ce réseau tout en proposant des solutions GSM (LTE-M ou NB-IOT) qui peuvent être à la fois complémentaires et concurrentes.

La topologie est étoile d'étoiles (un capteur peut communiquer avec plusieurs passerelles)

Les fréquences utilisables en France : 433 et 868MHz (fréquences ISM, libres donc sans licence)

C'est un protocole ouvert, libre d'accès, qui bénéficie de certification pour garantir la compatibilité des produits sur le marché

Il n'y a donc pas d'abonnement obligatoire au protocole LORA sauf à utiliser les réseaux d'opérateurs tels que Objenious ou Orange qui disposent d'une couverture nationale et parfois internationale, nécessaire en cas de capteurs mobiles (montés sur des objets voyageant tels que containers ou colis ou véhicules)

On peut créer son propre réseau LORA privé en utilisant une passerelle compatible LORA sur laquelle on connecte des capteurs eux-mêmes munis d'un module LORA. La passerelle se connecte sur le réseau internet via ethernet (box) et/ou un réseau GSM (2 3 ou 4 G et bientôt 5G) si un réseau internet n'est pas disponible à proximité (par wifi bluetooth ou ethernet) : **il y a maintenant de dizaines de milliers de réseaux privés LORA**

La modulation LoRa utilise l'étalement de spectre pour transmettre ces informations. Elle utilise la méthode appelée Chip Spread Spectrum.

Pour respecter la législation un objet connecté à LORA ne peut pas émettre plus de 1% du temps (36 secondes par heure)

Les spécifications définies par l'alliance LORA sont disponibles ici : <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-07/lorawan1.0.3.pdf>

https://lora-alliance.org/sites/default/files/inline-illustrations/LA_System_0.svg

La portée est comprise entre 2 km et 15 km suivant l'environnement urbain ou rural

Il y a 3 classes de communication (A, B, C).

- A : le capteur émet sans attendre une demande du serveur et attend 1 à 2 secondes un retour du serveur : la consommation est la plus faible
- B : périodicité des envois
- C : le capteur est à l'écoute du serveur en permanence, la consommation est la plus importante

L'écosystème LORA est devenu conséquent : plus de 500 sociétés sont membres de l'alliance LORAWAN, 137 opérateurs dans le monde

AMAZON vient de signer un accord avec SEMTECH (société détentrice des brevets LORA) pour l'utilisation du réseau LORAWAN dans son système SIDEWALK, réseau qui permet de contrôler des produits domestiques (éclairage, capteurs) plus loin que la portée wifi, bluetooth des box/routeurs

Une communauté de plus de 100 000 développeurs échange sur [the things network](#)

On y trouve des capteurs et passerelles « LORA » et un serveur déjà configuré pour des applications LORA, 13 472 passerelles disponibles dans le monde (300 en France).

[The things industries](#) est la version industrielle et sécurisée. Elle propose une plateforme de gestion d'un réseau LORA privé.

[IOT factory](#) : propose de mettre en place des réseaux privés essentiellement avec LORA mais leur plateforme est ouverte à tous les types de réseaux.

Les opérateurs télécoms français à couverture nationale :

En France 2 principaux opérateurs déploient des passerelles (stations de base) pour couvrir la France entière :

- **Objenious** : filiale de Bouygues télécom, est le 1^{er} opérateur français (plus de 4300 passerelles en 2019 couvrant 95% du territoire) [abonnement](#)
- Propose des solutions à la carte incluant des offres de capteurs de partenaires, une plateforme de traitement de données avec accès internet, un réseau dédié (extranet), accès au réseau 2G 3G 4G
- **Orange** : propose un raccordement à son réseau LORAWAN pour un abonnement annuel entre **12 et 24 euros par capteur**. Un relais supplémentaire (pour augmenter la couverture en intérieur par exemple) coûte 600 € (2018) avec abonnement clé 3G de 144€/an

Les opérateurs à couverture locale :

Ces opérateurs proposent des réseaux locaux LORA (et parfois LTE-M combiné) constitués d'une passerelle raccordée à internet avec envoi des données sur un cloud dédié

Ce dispositif à une passerelle locale peut être multiplié pour couvrir plusieurs sites industriels par exemple. La localisation par triangulation, comme dans les réseaux nationaux ne sera pas accessible, sauf à mettre suffisamment de passerelles.

Ces opérateurs fournissent le matériel et l'accès au cloud

Exemple [Multitech](#) (starter kit à environ 1000 €)

On peut construire soi-même un réseau local à l'aide de passerelles LORA disponibles chez des distributeurs (voir ci-après [la liste des distributeurs](#))

Les fournisseurs de passerelles LORA (exemples non exhaustifs) :

- **OPTION** :
- **KERLINK** :
- **MULTITECH** : à partir de 147 €
- **Laird connectivity** : 220 €
- **TEKTELIT** : 350 € à 1200 €
- **URSALINK** : 300 € à 800 €
- **FANSTEL** : 110 €
- **SEED STUDIO** : 54 € à 380 €

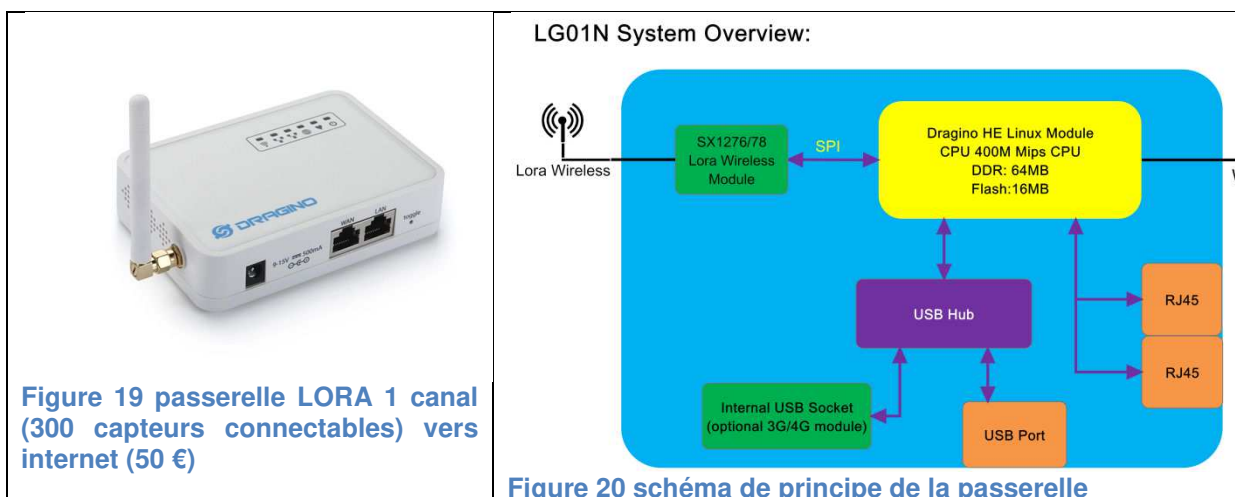


Figure 21 passerelle LORA

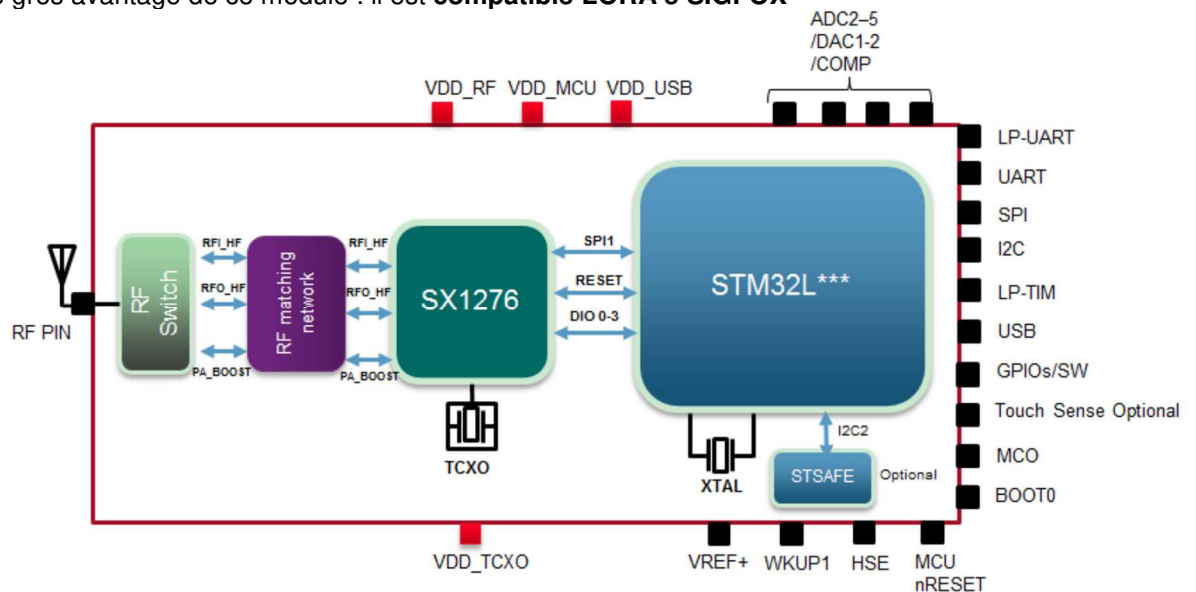
Fournisseurs de puces LORA (exemples exhaustifs pour les puces intégrant le microcontrôleur, le transmetteur et le protocole LORA) :

- **SEMTECH** le fondateur propose uniquement des transmetteurs RF
- **ST Microélectronics** : nouveau produit (02/2020) [STM32WLE5J8](#) intégrant un microcontrôleur et un transmetteur LORA (prix : 2.9€ par 10 k), ce qui veut dire un module LORA bientôt disponible à moins de 5€, ce produit est aussi compatible SIGFOX (mais ne contient pas en interne le protocole SIGFOX)

Fournisseurs de Modules LORA (exemples non exhaustifs) :

- **MICROCHIP** : ATSAMR35J17 intègre un microcontrôleur et un transmetteur LORA (4€)

- C'est un SIP (system in package) plus intégré qu'un module sur circuit imprimé mais moins qu'un SOC (comme le STM32WL)
- **MICROCHIP** : 2015 le 1^{er} module certifié LORA RN2483 (10€)
- **MURATA** : module de type [ABZ](#) basé sur un microcontrôleur STM32 de ST Microélectronics un transmetteur SX1276 de Semtech (prix : 9 € par 1000)
Le gros avantage de ce module : il est **compatible LORA e SIGFOX**



• **Figure 22 schématique du module LORA/SIGFOX de MURATA (CMWX122ABZ)**

- RF solutions : 18€
- [LPRS](#) : 18€
- Pycom : carte LORA SIGFOX WIFI bluetooth 34€



Figure 23 module multi protocoles de PYCOM

- ADAFRUIT industries : 15€
- LAIRD : 16€
- MULTITECH : 16€
- RENESAS

• **Sécurité** : il y a 2 niveaux de chiffrement AES128 mais récemment un questionnement sur la vulnérabilité du réseau LORAWAN est apparu dans la presse

Une société indépendante IOACTIVE considère que LORAWAN est vulnérable à des cyber attaques et proposent des solutions : [rapport](#)

Une puce de MICROCHIP contenant une clé de codage/décodage unique permet de sécuriser les communications (la clé est aussi connue du serveur)

Retour d'expériences :

- [Retour d'expérience d'un réseau LORAWAN à Strasbourg](#)

- [Mise en œuvre des réseaux longue portée, très basse consommation et bas débit dans la supervision de la ville de PARIS](#)
- [Gestion des eaux pluviale dans les villes](#)

11.1.3.2.2 Sigfox

Crée en 2009 par Ludovic Le Moan et Christophe Fourtet

Basé sur un système de communication UNB (ultra narrow band/bande de fréquence ultra étroite) de 100Hz.

Cette technologie de bande très étroite permet des communications de longue portée, 2 à 50 km suivant l'environnement mais avec peu de débit et données : 140 messages de 12 octets par jour (un message toutes les 10 mn)

La bi directionnalité est limitée (4 messages descendants par jour) et la plus sensibilité des modules par rapport aux récepteurs des stations ne permet pas une aussi longue portée que dans le sens montant. Ce réseau ne sera pas privilégié en cas de besoin de contrôle de processus (irrigation par exemple)

Il n'y a qu'un seul opérateur du réseau : SIGFOX. Ce qui constitue une faiblesse car la pérennité n'est pas encore assurée (la vente du réseau SIGFOX en Allemagne est peut-être le début d'un changement de stratégie).

Un réseau mondial d'antennes dont 2000 en France (chiffres Sigfox).

Sigfox annonce plus de 6 millions d'objets connectés (l'équivalent des 6 millions de compteurs d'eau de SUEZ)

La box de free intègre un module de SIGFOX qui prend le relais de la connexion en cas de problème (il ne s'agit donc pas de gérer des capteurs externes, la box étant considérée comme un capteur)

L'accès au réseau SIGFOX nécessite un abonnement de l'ordre de quelques euros par an (suivant le volume de données et le nombre de dispositifs).

Sigfox fournit les données sur son réseau internet. En cas de fermeture de Sigfox sans reprise de son réseau, les réseaux mis en place seraient irrécupérables.

On a pu lire dans la presse des prévisions, certainement trop optimistes, de modules Sigfox à quelques centimes d'euros. D'après son directeur général, l'avenir de Sigfox n'est pas encore assuré.

La pérennité du réseau Sigfox pourrait ne pas être liée à la société Sigfox dans la mesure où de grandes sociétés sont clientes et feraient en sorte que le réseau Sigfox perdure, en particulier dans le tracking d'objets au niveau mondial (Michelin au travers de la **société safecube** qui suit les containers, **DHL** qui suit 250 000 chariots de transport de colis)

Disponibilités matériels et prix :

Passerelles : contrairement au réseau LORA, ouvert, le réseau SIGFOX ne permet pas de concevoir un système privé avec de multiples passerelles qui concentreraient des capteurs vers son propre réseau. En cas de non couverture d'une zone il est possible d'installer une micro station (passerelle) qui couvre plusieurs centaines de km² (cout 468 € chez [Yadom](#))

Donc un capteur = un abonnement SIGFOX (ou plusieurs capteurs si chacun n'émet que quelques fois par jour. Dans la limite totale de 140 messages par jour, on pourrait donc connecter 140 capteurs sur un module émetteur Sigfox, mais cela nécessiterait un multiplexage et une électronique compliquée.

Puces Sigfox

Aucun chip ne contient le protocole SIGFOX, il faut passer au niveau modules qui contiennent des transceivers (émetteurs/récepteurs) compatibles SIGFOX auquel on ajoute un microcontrôleur pour piloter la communication. L'inconvénient de ne pas avoir de protocole intégré est qu'il faut entièrement le développer et le tester ce qui peut prendre plusieurs mois. Cela peut aussi signifier que les microelectroniciens ne sont pas suffisamment convaincus pour investir massivement dans cette technologie.

Plusieurs microelectroniciens proposent des transceivers (émetteurs/récepteurs) « SIGFOX compatibles », auxquels il faut rajouter un microcontrôleur et le protocole de pilotage :

- ON semiconducteur : famille AX-
- MICROCHIP : sous l'ancienne marque ATMEL ATAB8520E
- Texas Instruments : CC1120
- ST Microélectronics S2-LPTX
- NXP
- Silicon Labs

- Radiocrafts
- LPRS
- GCT semiconducteur GDM7243i
-

Modules Sigfox

Dans la liste des [fournisseurs agréés SIGFOX](#) on trouve 11 fabricants de modules

Il faut une certification SIGFOX pour communiquer sur le réseau SIGFOX.

D'autres fabricants ne faisant pas partie de la liste proposent des modules

- Radiocrafts, Murata

Les prix varient de 11€ à plus de 30 €

Sécurité :

Le cryptage, possible mais non obligatoire, des données depuis l'objet (capteur etc.) permet un degré de sécurité élevé . En particulier le non échange des clés de cryptage sur le réseau est un atout. (La clé est intégrée dans le capteur pendant la fabrication)

11.1.3.2.3 Wize / wireless M-BUS

Ces 2 réseaux s'adressent principalement aux compteurs d'eau gaz électricité et chauffage. Wize a pour ambition de s'étendre plus largement aux smart cities (villes intelligentes)

11.1.3.2.4 Le réseau WIZE :

L'alliance WIZE a été créée en 2017 par SUEZ, GRDF et SAGEMCOM sur la base d'une activité déjà existante depuis quelques années (13 ans) chez SUEZ et GRDF dans le domaine du télélevé de compteurs d'eau ou de gaz

Plus de 40 sociétés les avaient rejoints en 2019

Un réseau Wize est basé sur la bande de fréquence libre des 169 MHz destinée au télélevé de compteurs (eau, gaz, énergie, eau chaude)

Il utilise la norme européenne EN13757 qui définit le protocole pour les télérelevés des compteurs (relevé de données en général). Cette norme comprend 7 couches (comme le modèle OSI mais certaines couche OSI ne sont pas couvertes par la norme 13757), la couche physique de WIZE utilise la partie EN13757-4 (communication sans fil)

Les dispositifs reliés à un réseau WIZE envoient les données

- Soit sur un concentrateur (couvre un diamètre de quelques kilomètres) qui les retransmet sur les réseaux GSM 2 ou 3G ou un réseau propriétaire. Les données sont alors consultables via internet
- Soit sur un concentrateur puis vers un automate qui pilote l'installation

La bande des 169MHz présente plusieurs avantages

- Fréquence basse donc portée plus longue
- Puissance d'émission autorisée de 500mW (25mW pour LORA et SIGFOX) donc une portée théorique de 50km (20 km pour LORA et SIGFOX)
- Moindre sensibilité aux murs et blindage métallique

La fréquence basse, d'un débit moindre, ne contrarierait pas la transmission de quelques octets par jour, ce qui est le cas de la majorité des capteurs environnementaux « simples » (température, niveau, volume humidité taux de particules ou de gaz).

D'après les spécialistes consultés, la longueur des antennes est le principal frein au développement de cette bande de fréquence. Les 500mW autorisés compensent, par rapport aux bandes de fréquence à 20 mW (433, 868, 2400 MHz) les faibles gains des antennes. Il a été mentionné que l'adaptation d'impédance (déterminant pour le gain optimum de l'antenne), à cette fréquence, serait particulièrement sensible aux objets connectés à l'émetteur. C'est peut-être oublier qu'il existe des dispositifs adaptateurs d'impédances en particulier de la société californienne [Johanson technologies](#) qui conçoit aussi des antennes céramiques de très petites tailles (antennes 3D au lieu de 2D).

Une comparaison effectuée à Optomesures à 868 MHz des antennes filaires (câble coaxial dénudé), sur PCB, ou céramiques a montré qu'à longue distance la différence entre ces antennes était négligeable.

On pourrait donc raisonnablement penser que l'inconvénient de la taille de l'antenne 169 MHz, augmentée de 5 par rapport à la bande 868 MHz, pourrait être levé par la possibilité de réaliser des antennes céramiques 169 MHz miniatures.

- à 868MHz la taille d'une antenne céramique est de 7X2x1.2 mm (antennes (exemple : [Johanson technologies](#)), on peut donc imaginer une antenne 169 MHz de volume de 12x3.4x2 mm (augmentation d'un facteur racine cubique de 5 dans chaque direction), tout à fait acceptable pour envisager des applications IoT portables.

La volonté d'ouvrir le réseau WIZE et le rendre public est probablement motivée par la possibilité de réduction des coûts du matériel avec la quantité,

L'écosystème autour du réseau WIZE est faible en comparaison avec LORA ou SIGFOX (40 sociétés versus plus de 500)

Utilisation de WIZE :

GRDF utilise WIZE sur ses compteurs GASPARD et devrait avoir converti 11 millions de compteurs d'ici 2022. Il est prévu l'installation de 15 000 concentrateurs produits par la société Sogetrel et répartis sur les 9500 communes desservies en gaz par GRDF.

SUEZ utilise WIZE sur ses compteurs d'eau (plusieurs millions de compteurs déjà équipés)

Il faut être membre de l'alliance WIZE pour pouvoir profiter des spécifications techniques de WIZE

Disponibilité matérielle et prix:

- La disponibilité de transmetteurs 169 MHz d'une puissance de 500mW (27dB) est très faible
 - Seule la société **Radiocrafts** (membre de l'alliance WIZE) commercialise un [transmetteur Wize](#) à 17€ par 1000 auquel il faut rajouter une carte microcontrôleur (existant dans les compteurs de SUEZ et de GRDF)
- Les fabricants de circuits intégrés n'ont pas encore intégré le protocole WIZE dans leur puce, ce qui rendrait l'utilisation de WIZE compliquée et coûteuse pour une société aujourd'hui externe à l'alliance WIZE.

11.1.3.2.5 Le réseau wireless M-BUS :

Il est aussi basé sur la même norme EN13757-4 (la couche « sans fil » de la norme qui en compte 7) que WIZE mais bénéficie de nombreux circuits intégrés ou module intégrant le protocole WM-BUS, plusieurs fréquences (libres) sont disponibles (169, 433 ou 868 MHz)

Quelques fournisseurs de puce wireless M-BUS

- **Texas instrument** : (a participé à la création du M-BUS) : la puce [cc1310](#) de la famille des circuits sub GHz (315 à 920 MHz) ou la puce [cc1120](#) fournissent le stack (protocole) W M-BUS (cout de la puce < 2€)
 - Le cout d'un module complet peut être, en quantité, de 5 à 10 €
- **Silicon labs** : les circuits de la famille EZR32W https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/EZR32WG330_DataSheet.pdf intègrent un transmetteur 142 à 1050MHz, un microcontrôleur 32 bits et de nombreuses entrées sorties (41) pour gérer des capteurs .Le protocole W MBUS est facilement programmable. Le prix du circuit est d'environ 5€. pour obtenir la puissance d'émission maximum (500mW à 169 MHz) il faut rajouter un simple transistor FET à 0.5€
 - Le cout d'un module complet peut être, en quantité, de 10 à 15€
- **ST microelectronics** : propose des composants (microprocesseur (MCU), transmetteurs) t adaptateur d'impédance d'antenne (balun) permettant de réaliser des modules W M-BUS
 - Le cout d'un module complet pourrait être, en quantité de 5 à 10 €

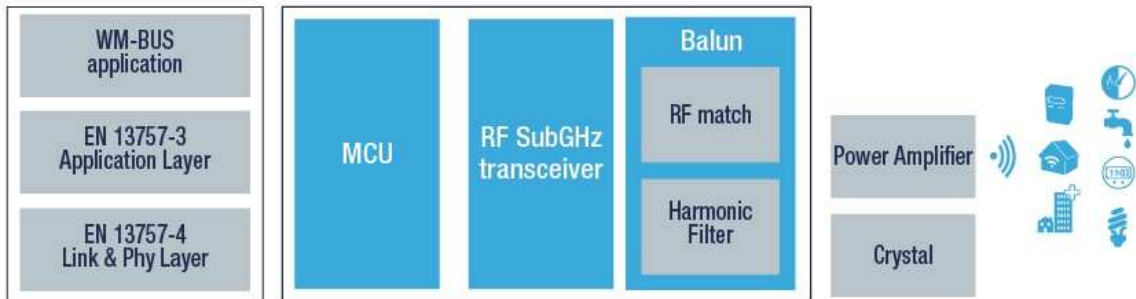


Figure 24 Document extrait de la [page de STMicroelectronics sur W M BUS](#)

Fournisseurs de modules W-MBUS

- radiocrafts: le module WIZE peut être utilisé pour W M-BUS (17€/1000)

11.1.3.2.6 WI-SUN

Le réseau intelligent ubiquitaire sans fil (Wi-SUN) est une technologie basée sur la norme IEEE 802.15.4g. Il est soutenu par le Wi-SUN Alliance TM, une alliance industrielle mondiale qui promeut la Spécification Wi-SUN.

Wi-SUN a une organisation tierce qui développe des tests pour certifier que basé sur IEEE 802.15.4g l'équipement IoT est à la fois conforme à la norme et interopérable avec d'autres équipements certifiés Wi-SUN

Les réseaux prennent en charge les topologies en étoile et maillé, ainsi que les topologies hybrides déploiements en étoile / maillage, mais sont généralement disposés dans un maillage topologie où chaque nœud relaie les données du réseau vers fournir une connectivité réseau. Les réseaux Wi-SUN sont déployés sur les appareils alimentés et fonctionnant sur batterie.

11.1.3.2.7 Les reseaux dits "propriétaires"

Les réseaux dits "propriétaires" sont basés sur les circuits intégrés (SoC system on chip) des fabricants (Texas instruments, ST Microélectronique Silicon labs etc.) Avec le protocole développé par le fabricant mais correspondant néanmoins à une norme (souvent la norme IEEE 802-15-4.)

L'architecture des circuits avec les autres protocoles cohabitant sur la puce SoC est identique : une même puce servira à plusieurs usages suivant le logiciel intégré dans une mémoire statique ou dynamique (LORA, SIGFOX, WM BUS LTE-M etc.

Exemple de circuit intégré multi protocole dont un protocole propriétaire (et d'autres)

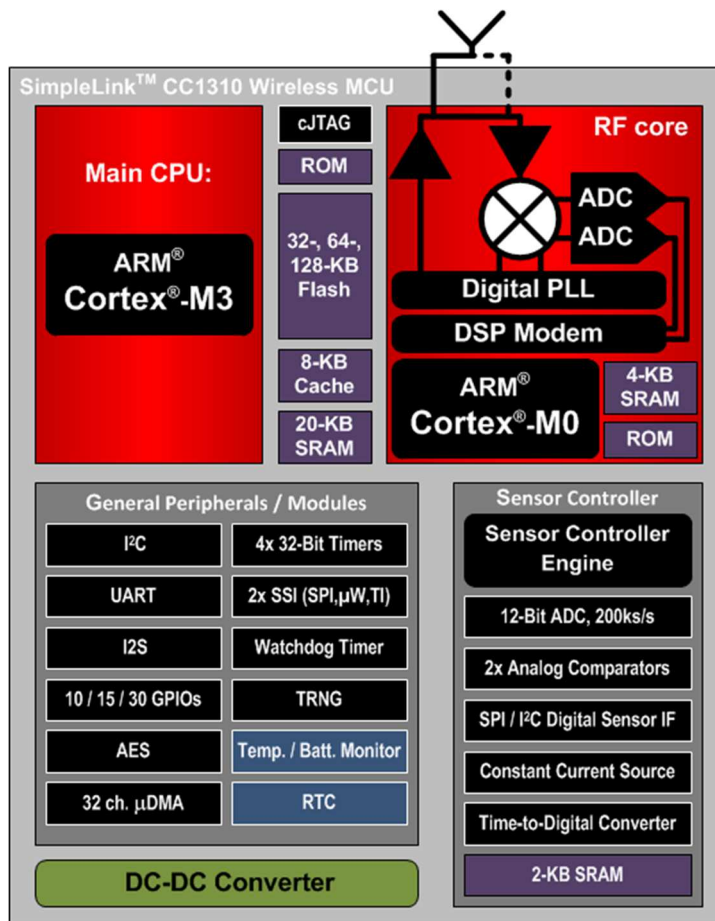


Figure 25 schéma de principe d'un microcontrôleur transmetteur de TI, le CC1310

On remarquera la complexité et le nombre de fonctions assurées par une puce de 4mx4m, qui fait office de :

- microcontrôleur (ARM cortex M3) avec mémoires
- transmetteur (RF core) de 315 à 920 MHz
- permet l'utilisation des protocoles : IEEE 802.15.4g (base du système propriétaire), IP-Enabled Smart Objects (6LoWPAN), Wireless M-Bus, KNX Systems, Wi-SUN™
- de 10 à 30 à entrées sorties (GPIO, general purpose input output) qui permettent la connexion d'autant de capteurs et actionneurs
- un système complet de traitement de capteurs (la partie capteurs peut rester éveillée pendant que le reste demeure inactif pour économiser de l'énergie)

C'est une architecture « standard » que l'on retrouve chez les autres fabricants.

L'intérêt de ces puces à protocole propriétaire est le fait de n'être lié à aucun consortium, sans besoin de licence d'exploitation.

On peut réaliser un réseau de capteurs local, dont il faudra développer les passerelles avec des puces du même type. Sans abonnement au final.

Ces solutions peuvent être développées par des bureaux d'études électroniques.

Le coût matériel de tel réseau local peut être très compétitif :

1) Modules avec puces SoC (système complet émetteur/récepteur avec microcontrôleur) :

Composants	Prix unitaire (quantité > 1000)
Puce SoC (system on chip)	2.5 à 3.5
Composants passifs (Quartz, capa etc.)	2
Antenne intégrée (céramique ou PCB)	0.5
PCB (circuit imprimé)	0.5 à 1
assemblage	0.5
boîtier	3 à 20
Cout Total d'un module sans capteurs	9 à 27 euros

2) L'interconnexion avec des capteurs :

Est rendue possible grâce aux nombreuses entrées/sorties (GPIO) des puces :

- 10 à 30 pour le CC1310 de TI.
- 22 à 43 pour le STM32W de ST
- 16 pour l'EZR32WG330 de Silicon labs

Des capteurs « basiques » de type température humidité gaz (MOS ou MOX) peuvent être montés sur le circuit imprimé ou déportés

Les liaisons capteurs / modules sont de type I2C, SPI, UART, ADC etc., protocoles présents dans toutes les puces SoC

Toute la panoplie des microcapteurs de gaz ou particules peut ainsi être connectée au module pour un coût très faible

Type de capteur	Coût par quantité (> 100) en €
Température	1 à 2
Température et humidité	1 à 3
NO2	12 (MOx)
CH4	20 (électrochimique) à 200 (IR)
CO2 (NDIR)	50
Particules PM2.5	20 à 30
GPS	10 (ou inclus dans la carte ordinateur)

3) les passerelles

Pour constituer une passerelle, qui relie les modules au réseau internet public ou un intranet local via une liaison WIFI ou un câble ethernet avec une box (livebox freebox etc.), il faut une carte « ordinateur » de type raspberry arduino ou linkit one et un module émetteur/récepteur, qui peut être constitué de la même puce que celle utilisée dans les modules.

Une passerelle « basique » pourrait même être constituée de la seule puce SoC des modules à laquelle on adjoint un module WIFI, BLUETOOTH ou GSM, parfois intégré.

Passerelle « standard »

composants	Coût par quantité (> 100)
Carte « ordinateur » (type raspberry)	20 à 60
Module Emetteur/récepteur	7 à 10
boitier	5 à 20
Antenne déportée (optionnelle)	4 à 20
montage	5 à 20
Total coût matériel passerelle	41 à 130 euros

Passerelle « basique »

composants	Coût par quantité (> 100)
Module WIFI	1 à 3
puce Emetteur/récepteur	2.5 à 3.5
PCB	0.5
Montage composants	0.5
boitier	5 à 20
Antenne déportée (optionnelle)	4 à 20
montage	5 à 20
Total coût matériel passerelle	18.5 à 67.5 euros

Ce développement ne peut être intéressant que pour des solutions « grands volumes » c'est-à-dire un nombre de modules capteurs supérieur à 10 000 (par exemple si on envisage un grand projet d'instrumentation dans des villes)

C'est une solution à mettre en concurrence avec une solution qui utilise des modules LORA et des passerelles LORA, déjà disponibles, sans abonnement, avec connexion sur le net (exemple : passerelle seeed studio à 54 € à laquelle on peut connecter jusqu'à 300 modules LORA, chaque module LORA pouvant être du même coût qu'une solution module avec puce « propriétaire »)

Cout du developpement :

La programmation, la validation, la mise en production à la fois des modules et des passerelles, tels que décrits ci-dessus, nécessitent un budget de 100 à 200 k€ et un délai d'environ 1 an.

Ce budget et ce délai peut être réduit à condition de trouver des sociétés qui accepteraient d'utiliser les briques matérielles et logicielles qu'elles ont déjà développées en interne pour des projets similaires (exemple : les TPE concevant et fabricant des réseaux de capteurs telles que celles participants au challenge microcapteurs de airlab)

Un budget supplémentaire est nécessaire pour la mise en place d'un logiciel de traitement des données. Une fourchette budgétaire pour ce type de développement logiciel est vaste selon le cahier des charges : selon que le client accepte de s'adapter à des solutions existantes (plateformes Microsoft Amazon Google Ibm ou propriétaire) ou demande un développement sur mesure.

11.1.3.3 Les réseaux courte portée LAN (local area network)

Ces réseaux sont dits locaux et de courte portée (inférieure à 100 mètres) mais si les capteurs sont connectés à une passerelle (gateway), elle-même reliée à internet, ils deviennent des réseaux très longue portée.

Ce sont des solutions souvent faciles à mettre en œuvre et d'un cout de connexion égal à celui d'un routeur internet (livebox, freebox etc.) pour un nombre de capteurs qui peut dépasser atteindre plusieurs milliers (zigbee).

Le cout de la fonction réseau dans les capteurs associés s'élève à quelques euros et les solutions sont nombreuses.

Le choix pour ce type de configuration se justifie principalement pour des applications intérieures, petits locaux industriels ou maisons particulières. Le cout de raccordement est celui de l'abonnement internet du box. Les débits sont généraux (plus de 250kbits/s)

Lorsque les distances ou le nombre d'obstacles (2 à 3 murs épais) diminuent la qualité de transmission il devient nécessaire de passer à des configurations de réseau LPWAN de type LORA ou SIGFOX OU à une configuration GSM (LTE-M, NB-IOT). Les débits de données sont alors réduits ainsi que les temps de latence, ce qui ne permet plus l'utilisation en mode « temps réel » dans des processus industriels (à l'exception du réseau LTE-M dont la latence est de l'ordre de 100 à 150 millisecondes).

11.1.3.3.1 Bluetooth

Bien connu du public, présent sur les smartphones tablettes et pc Utilise la norme IEEE 802-15-1

La portée : 10 à 100 mètres

La dernière version dite BLE (LE pour low energy)

De nombreuses puces et modules permettent d'ajouter à un produit la fonction bluetooth pour quelques euros

11.1.3.3.2 WIFI

Le plus connu du public. Installé sur tous les PC smartphone tablette imprimantes box internet Utilise la norme IEEE 802-11

La portée intérieure n'excède pas 10 à 100 mètres suivant le type de matériaux et le nombre de murs à traverser. Des répéteurs permettent d'étendre la portée

Des solutions externes avec de bonnes antennes permettent d'atteindre quelques kilomètres

De nombreuses puces et modules permettent d'ajouter à un produit la fonction wifi pour quelques euros

11.1.3.3.3 Zigbee

Protocole définit par la norme IEEE 802-15-4

- Fréquence porteuse : 2.4MHz
- Bi directionnel

- Débit : 250 kbit/s
- Topologie de réseau accepté
 - maillé : Problème du maillage (mesh) surconsommation due à la nécessité de chaque nœud du réseau de ré émettre à tout moment et donc de rester éveillé (actif) à proscrire pour les systèmes en autonomie énergétique difficile (sur pile ou batterie)
 - Point à point
 - Étoile
- Portée de 100 mètres en intérieur et 1 km en extérieur

Exemples de Puces et modules zigbee disponibles :

Texas instruments

- Famille [cc2530](#) spécialement dédié à zigbee (depuis 2009)
- Modules 500mW portée 2.5km topologie maillé (mesh) (prix de 5€) : on trouve des module zigbee à 500mW mais cette puissance est interdite en France exemple : <http://www.zigbeesolutions.com/zigbee/new-cc2530-small-e18-2g4z27si-mesh-109111012294431656.html>

NXP:

- Transmetteur multi protocole (zigbee, W Mbus, SIGFOX, KNX) : <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/OL2385.pdf> (prix 1.5€)
- Transmetteur zigbee avec microcontrôleur : <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/JN516X.pdf> (prix 1.5€)
- Modules zigbee : <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/JN5168-001-MXX.pdf> (prix 12 €)

DIGI :

- modules zigbee (qui prennent le nom de XBEE®)

Chaque module XBEE peut jouer le rôle de maître (concentrateur) ou d'esclave (capteur)

- Passerelles/routeurs :

Permet de connecter directement les modules (ou capteurs) zigbee à un réseau IP (internet) ou ethernet

DIGI propose des passerelles pour la famille des XBEE :

https://www.digi.com/pdf/ds_xbeegateway.pdf (prix : 120€)

- On peut aussi réaliser son propre routeur avec une carte de type raspberry et un module XBEE programmé en coordinateur.

11.1.3.3.4 Weightless:

Weightless

Dans la famille LPWAN, le matériel Weightless a été lancé par Ubiik Inc en juillet 2017 et depuis lors, l'écosystème s'est développé à plus de 100 entreprises réparties dans 40 pays.

À l'origine, il y avait trois normes de connectivité Weightless publiées, Weightless-P, Weightless-N et Weightless-W. Weightless-P est resté grâce à sa bidirectionnalité et l'utilisation des fréquences ISM.

Weightless est géré par le Weightless SIG, ou Spécial Interest Group, depuis 2012. Le but est que les appareils doivent être qualifiés par le Groupe d'Intérêt Spécial selon les normes définies par le SIG. Les brevets ne seraient concédés que pour ces appareils éligibles ; ainsi le protocole, bien qu'ouvert, peut être considéré comme propriétaire

Exemple de société utilisant weightless : Nwave est une société spécialisée dans l'IoT pour le parking (municipalités, entreprises universités), elle annonce des portées 4 fois supérieures à Sigfox et LoRa mais seulement 2000 capteurs vendus en 4 ans

11.1.4 La concurrence dans les réseaux / l'IoT

Le marché des objets connectés, estimé en 2020 à 25 / 80 milliards d'objets pour atteindre de 80 à 1000 milliards en 2023 excite à la fois la convoitise des industriels de l'IoT et des opérateurs télécom. Les opérateurs télécom ont intérêt à profiter de leur réseau déjà en place, moyennant quelques adaptations matérielles et logicielles, alors que les industriels ont intérêt à promouvoir l'installation d'une nouvelle infrastructure.

Le concept de réseau sans fil est maintenant bien établi et les technologies relativement matures

On peut donc évaluer la pertinence d'un réseau à la taille de son écosystème associé, constitué des fournisseurs de matériel ou de services et par le nombre et le profil de ses utilisateurs.

En particulier la disponibilité de puces (chip, chipset) intégrant un logiciel dédié au réseau préfigure des coûts futurs optimisés d'une solution (avantage LORA par rapport à SIGFOX par exemple)

La première société partie dans la course de l'IoT longue distance, SIGFOX, en 2009, a réussi à susciter une forte concurrence, c'est déjà une réussite en soi, même si l'avenir de la société Sigfox soit incertain à courte et moyenne échéance (1 à 5 ans).

11.1.5 Les acteurs des réseaux de capteurs

L'écosystème d'un réseau de capteurs est constitué d'industriels associés à une filière électronique et numérique déjà existante (non spécifiques IOT) c'est-à-dire :

Fabricants de matériel de base :

- Capteurs
- Électronique active : Microcontrôleurs émetteur/récepteur (transmetteur)
- Électronique passive : circuits imprimés, condensateurs, résistances, inductances, antennes, piles, batteries
- Boîtiers électroniques : plasturgistes

Fabricants de matériels de plus haut niveau :

- Passerelles/routeurs/commutateurs/concentrateurs
- Antennes relais (massives)
- Interfaces homme/machine : PC, smartphone, tablette, écrans d'automates
- Data center (réseau internet)

Distributeurs : revendent le matériel, certains proposent le conseil pour l'architecture et la constitution du réseau

Intégrateurs : maitres d'œuvre qui prennent en charge tout ou partie d'un réseau, ils ont généralement en interne des développeurs (de logiciel) : logiciels dans les capteurs (microcontrôleurs), dans les passerelles (cartes électroniques), dans les serveurs (cloud, sites internet, dans les interfaces hommes machines (PC, tablettes, smartphone)

Opérateurs télécom : proposent et gèrent un ensemble de relais qui constituent un réseau à couverture nationale ou internationale. Ils acheminent des données. Via des réseaux terrestres ou satellitaires

Opérateurs internet : fournisseur d'accès internet (FAI)

Fournisseurs de services : proposent de gérer des données pour les clients, c'est une fonction que les intégrateurs assurent bien souvent au travers de plateformes

11.1.5.1 Les fabricants de capteurs

Il existe de très nombreux fabricants de capteurs pour mesurer des grandeurs physiques ou physico-chimiques.

Depuis l'apparition de l'IOT plusieurs sociétés proposent des capteurs reliés aux réseaux sans fil en particulier pour des mesures « simples », telles que température ou humidité. De nombreux microcapteurs de gaz à partir de technologies MOS/MOX (métal oxyde semiconducteurs) ont aussi été développés dont la sélectivité peut être changée par l'application d'un profil (modulation) de température de l'élément de chauffe.

Les microcapteurs de gaz basés sur la technologie MOX/MOS sont produits par quelques 70 sociétés à travers le monde à des prix avoisinant 10 à 20 euros. Leur intégration dans des systèmes d'analyses de l'air fait parfois bondir le prix de vente de la fonction (coûts de développements ?)

Paramètre mesuré	Technologie (exemple)	Précision annoncée	Coût du composant capteur de base (euros)
température	MOS	1 % (+/-0.2 °C)	2
Température humidité	MOS	1%	3
Qualité de l'air intérieur (CO ₂ eq, TVOC, H ₂)	MOX r	?	10
CO ₂	Infrarouge	70 ppm	70
CH ₄	MOX	3%	20
	infrarouge		200
O ₃	électrochimie	3%	17 à 60
NO ₂	MOS	3%	12
	electrochimie		50 à 100
PM _{2.5}	Diffraction laser	5%	20
SO ₂	électrochimie	1%(mais drift 24% /an)	50 à 75
H ₂ S	électrochimie	1% (mais drift 20% /an)	30
Triple (NH ₃ , CO, H ₂ etc)	MOS	?	8

Tableau 12 : exemples de capteurs environnementaux "basique"

Les problèmes majeurs des microcapteurs sont la nécessaire calibration initiale, les sensibilités multiples (interférences), les destructions par saturation non réversibles, les dérives (pente et origine). L'historique de la vie d'un microcapteur peut devenir lourd à gérer.

11.1.5.2 Fabricants de capteurs connectés

Dans la grande majorité des TPE

Par exemple, les fabricants qui participent au challenge AIRLAB :

ENVEA, ECOMESURE, ZAACK, VAISALA, SIM ENGINEERING, POLLUTRACK, MEO AIR ANALYTICS, LOTHOSOFT GmbH, KUNAK technologies SL, KAITERRA, IQAIR AG, IN BIOT MONITORING SL, HABITATMAP, ECOLOGICSENSE, DECENTLAB GmbH, CLARITY MOVEMENT Co, AZIMUT-MONITORING, AGRISCOPE, ADDAIR, 42FACTORY, AIRLABS, AIRLY, ETHERA, NANONSENSE, RUBIX

D'autres : NKE (réseau LORA), ISWIP

11.1.5.3 Les microelectroniciens

Dans cette catégorie on trouve une partie des principaux fabricants de circuits intégrés

Tableau 13 liste des plus gros microelectroniciens et leur implication dans l'IOT

fabricant	C-A 2017	Siege social	Transmetteurs IOT	Microcontrôleur Avec transmetteur
Texas instruments	9.9	US	x	x(LPWAN)
Analog devices	4.3	US	x	
Infineon	3.3	Allemagne		
STMicorelectronics	2.9	Suisse	x	x(LPWAN)
NXP Semiconductors	2.4	Pays bas	x	
Maxim integrated	2	US	x	x (Bluetooth)
ON semiconductors	1.8	US	X	
Microchip	0.9	US	x	x
renesas	0.9	Japon		
Silicon labs	0.84	US	x	x
semtech	0.6	US	x	
Bosch semiconductor	0.77	Allemagne		
Nordic semiconducteurs	0.27	Finlande		x (LPWAN, LAN,LTE)

11.1.5.4 Les fabricants de modules

Les modules sont des petites cartes électroniques contenant à la fois un transmetteur et un microcontrôleur qui accepte un ou plusieurs protocoles sans fil).

Tableau 14 liste des principaux fabricants de modules pour réseaux sans fil

société	pays	LORA	SIGFOX	LT-E NB-IOT	W MBUS	Bluetooth wifi	zigbee	Z-WAVE
radiocrafts					x			
Miromico	Suisse							
Murata	Japon	x	x					
Panasonic	Japon					x		
Microchip	US							
DIGI	US			x			x	
TI	US					x		
Silicon labs	US							x
STMicroelectronics	Suisse					x		
RF solutions		x						
NXP	Pays bas						x	
Nemeus	France	x	x					
renesas	Japon					x		
Bosch	Allemagne					x		
Nordic	Finlande			x				

11.1.5.5 Les distributeurs de composants :

Les principaux distributeurs mondiaux spécialisés dans les composants électroniques et produits industriels proposent des solutions IOT de tout type, industriels, domestiques, médicaux. Chacun a une page dédiée IOT pour bien marquer l'importance croissante de ce domaine.

Distributeurs « Vente en ligne » :

- RS : <https://fr.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=i/iot-internet-of-things>
L'environnement IOT décrit par RS :

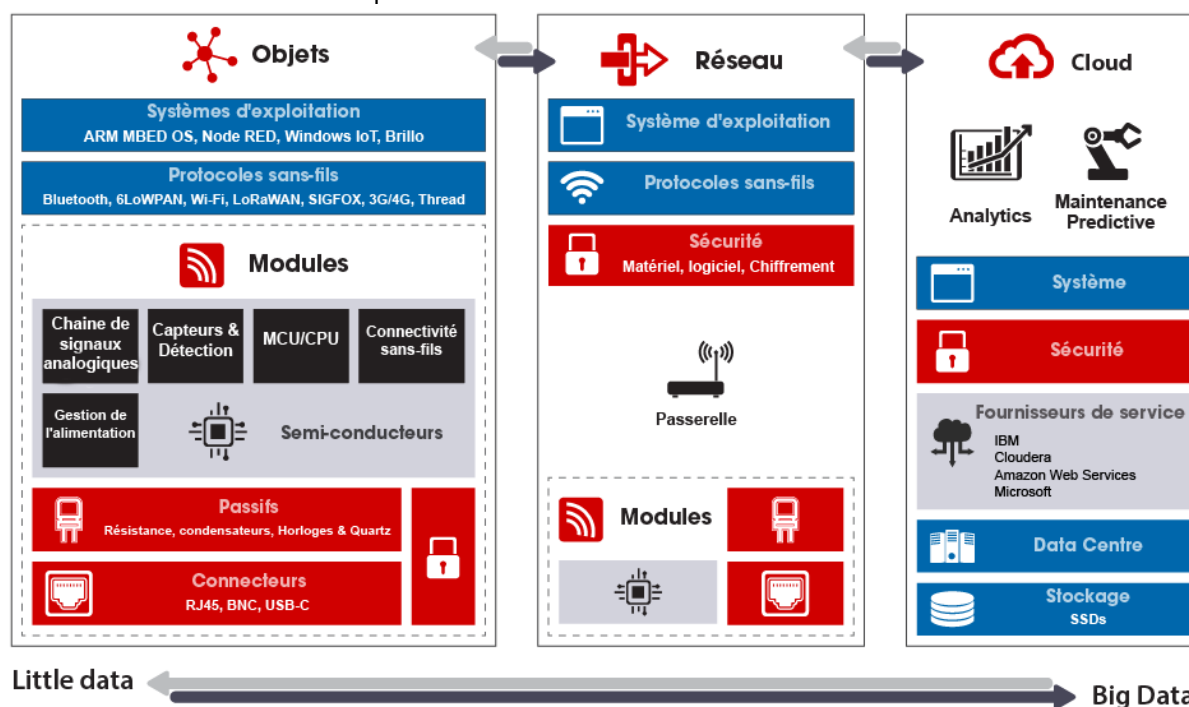


Figure 26 les briques structurelles de l'IOT (extrait du site RS)

- MOUSER : <https://www.mouser.fr/applications/internet-of-things/>
- DIGIKEY : propose en plus de tous les composants IoT
 - une solution de conception simple <https://www.digikey.fr/fr/resources/design-tools/dk-iot-studio>
 - Ou un sélecteur de solutions IOT : <https://www.digikey.fr/fr/resources/iot-product-selector>
- FARNELL : <https://fr.farnell.com/internet-of-things>

Argument publicitaire de FARNELL « Nous pouvons prendre en charge votre prochaine application IoT :

900 000 Produits en stock pour la prise en charge de la conception IoT **10 000** Plates-formes de développement pour accélérer le développement de votre passerelle **16 000** Solutions de capteurs pour concevoir votre dispositif périphérique **1 000** Solutions de connectivité pour rester connecté »

Distributeurs « Vente en compte » (et en ligne accessoirement) :

- **ARROW electronics:** 175 000 fournisseurs, 336 bureaux mondiaux, C-A 29 Milliards£ (2019) ARROW, en plus de distribuer les composants permettant de fabriquer un réseau, est très actif dans l'IOT industriel et noue de nombreux partenariats : <https://www.arrow.com/fr-fr/iot>
- **AVNET :** <https://www.avnet.com/wps/portal/us/solutions/iot/> (plateforme cloud IOT proposée)

- **EBV** (filiale d'AVNET) : <https://www.avnet.com/wps/portal/ebv/solutions/iot/ebv-iot/>
- **FUTURE electronics**: <https://www.futureelectronics.com/fr/our-solutions/iot-solutions>

11.1.5.6 Les achemineurs de données (Les opérateurs télécom)

Nous incluons les sociétés qui installent, gèrent le système de télécommunication physique ou simplement louent ce système.

En France nous avons 5 opérateurs télécom (voir [les fiches](#)) :

- ORANGE
- BOUYGUES TÉLECOM
- SFR
- FREE
- SIGFOX

A ces opérateurs nationaux il faut rajouter les intégrateurs qui sont capables de créer des réseaux locaux dédiés, qui, multipliés et développés sur le territoire peuvent ressembler à des réseaux de type nationaux.

11.1.5.6.1 Les fiches synthétiques opérateurs

OBJENIOUS (Bouygues télécom)	OPERATEUR DE TÉLECOMMUNICATION DEDIE IoT
Siege social	France
Origine capital	
employés en 2019	≈30 (Bouygues télécom : 5300)
Année de création	2016 (réintégré dans Bouygues télécom en 2019)
CA 2019	4 M€ (2018) (Bouygues 5.5 G€)
Bénéfices 2019	NC (Bouygues 451 M€)
Nombre de brevets	377 (Bouygues télécom)
Filiale de	Bouygues télécom
Lauréat au concours	
Produits phare	offre accès réseau LORA et 2, 3, 4,5G
Prix (euros)	
Site internet	
Technologie utilisée	
Nombre d'antennes	4300
Nombre de clients	>400 (2018)
Nombre d'objets connectés sur le réseau	100 000 (2018)
Opinion banques	
Opinion presse	
Commentaire de l'expert	

ORANGE	OPERATEUR DE TÉLÉCOMMUNICATION
Siege social	France
employés en 2019	≈68 870
Année de création	1991
CA 2018	23 G€
Bénéfices 2018	2.5 G€
Nombre de brevets	>5000
Filiale de	
Lauréat au concours	
Produits phare	offre accès réseau LORA, 2, 3, 4,5G LTE-M
Prix (euros)	
Site internet	
Technologie utilisée	LORA, LTE, GSM
Nombre d'antennes	
Nombre de clients	
Nombre d'objets connectés sur le réseau	
Opinion banques	
Opinion presse	
Commentaire de l'expert	

SFR	OPERATEUR DE TÉLÉCOMMUNICATION
Siege social	France
employés en 2018	≈6598
Année de création	1987
CA 2018	8.6 G€
Bénéfices 2018	- 5 M€
Nombre de brevets	204
Filiale de	ALTICE (c-a : 15 milliards)
Lauréat au concours	
Produits phare	offre accès réseau NB-IOT, 2, 3, 4, G (SFR IOT connect)
Prix (euros)	10 €/an pour 500 ko / mois
Site internet	
Technologie utilisée	NB-IOT, GSM
Nombre d'antennes	46 176
Nombre de clients	15 millions
Nombre d'objets connectés sur le réseau	
Opinion banques	
Opinion presse	
Commentaire de l'expert	Le NB IOT est bien implanté à l'étranger mais encore peu en France

Sigfox	OPERATEUR DE TÉLÉCOMMUNICATION réseau SIGFOX
Siege social	France labège
Taille en 2018	≈450
Année de création	2009
CA 2018	60 Millions €
Bénéfices 2018	0€
Nombre de brevets	215 (oct. 2020)
Filiale de	
Lauréat au concours	
Produits phare	Réseau SIGFOX
Prix (euros)	3 à 10 € /an/capteur
Site internet	https://www.sigfox.com/
Technologie utilisée	UNB (bande ultra étroite)
Nombre d'antennes	2000 (2017)
Nombre de clients	>400 (2018)
Nombre d'objets connectés sur le réseau	16 Millions d'objets connectés au réseau (2019) (données Sigfox)
Opinion banques	
Opinion presse	
Commentaire de l'expert	<p>Facteur de risque : SIGFOX est l'opérateur unique du réseau SIGFOX</p> <p>Des promesses de modules à 0.02€ irréalistes</p> <p>Le plan de réduction de 50 employés d'octobre 2020 laisse présager un avenir incertain. Le démarrage de la vente du réseau physique de SIGFOX (les émetteurs/récepteurs) pourrait rassurer quant à la pérennité du réseau SIGFOX indépendamment de la société SIGFOX</p> <p>Le marché de l'IOT en campagne a certainement été surestimé alors que le marché de l'IOT en zone urbaine peut être avantageusement adressé par d'autres solutions (5G LORA wifi bluetooth) à portée moins longue mais à débit nettement supérieur et possibilité de communication bi directionnelle, indispensable dans le cas de pilotage d'équipements.</p> <p>On ne peut qu'espérer que le réseau SIGFOX soit repris par d'autres en cas de faillite de la société SIGFOX. Mais l'explosion du nombre de clients et d'objets connectés Sigfox n'est pas acquis.</p> <p>Il est donc prudent de préférer le réseau LORA ou un système pouvant passer facilement de SIGFOX à LORA ou inversement sans avoir à modifier physiquement des pièces (OTA, reprogrammation à distance)</p>

11.1.5.7 Les fabricants de relais/passerelles/routeurs (équipementiers telecom)

Cisco, Kerlink, Nortel etc., à la fois mastodontes et PME sont sur ce marché

11.1.5.8 Les intégrateurs/fournisseurs de services ou d'infrastructure

Nous incluons les sociétés qui proposent des solutions clé en mains, du capteur à la visualisation sur smartphone ou PC, ou seulement une partie de la chaîne (la connectivité par exemple ce qui inclut la réception de données, leur traitement et la présentation à l'utilisateur).

Les sociétés proposent de plus en plus des solutions sur plateforme avec l'argument d'une facilité de configuration des capteurs et de visualisation des données.

Les solutions font souvent appel à réseaux de transmissions multiples (GSM M2M (LTE-M 2G/3G/4G), LORA et Sigfox par exemple) pour faire face à des couvertures inégales suivant les régions.

Des alliances avec des constellations de satellites permettent d'offrir une continuité de services pour des applications mobiles (suivi de container, de véhicules, de personnes etc.), ce qui n'est pas particulièrement recherché dans des réseaux de capteurs environnementaux destinés surtout à contrôler des environnements fixes (exception faite de flottilles de véhicules munis de capteurs et se déplaçant en ville.)

Dans les offres de service, les plateformes en particulier, il y a parfois lieu de distinguer les applications de « **data management** » (gestion des données) des « **device management** » (gestion des modules). Ou « **connectivity management** » (gestion des communications)

- 3 « pépites » innovantes françaises de l'IOT sont sous la surveillance active des investisseurs : Actility, Kerlink et Sigfox

ACTILITY

122 personnes (2019)

Chiffre d'affaires (millions d'euros) 10.3 en 2019 : 12.8 en 2018

Résultat d'exploitation – 11 (2019), -19 (2018) -24 (2017) -9(2016)

Société continuellement en perte d'exploitation depuis sa création (2010)

Seul résultat net de 5 millions en 2019 (malgré la perte d'exploitation de 11 millions)

Une levée de fond de 70 millions d'euros en 2017 explique la continuation de cette société et montre les espoirs qu'on en attend (Sigfox a aussi bénéficié de levée de fond de 150 millions malgré un chiffre d'affaire qui stagne à 60 millions d'euros)

Les investisseurs :

La famille Mulliez, (Leroy Merlin), Bosch, Foxconn, (sous-traitant d'Apple), Cisco, Orange, Swisscom, Inmarsat, KPN, BNP Paribas, * BPI France, l'Etat Français, des fonds d'investissement Idinvest Partners, Ginko Ventures

La filiale énergie (Actility Energy) a été rachetée par VEOLIA en 2019 : la plateforme Thinkpark d'Actility est utilisée pour gérer le pompage par exemple |

Missions d'Actility (tel que décrits dans son site) :

Actility accompagne les fournisseurs de services et les entreprises tout au long du cycle de vie de leur réseau IoT, du déploiement de la connectivité à la monétisation de masse

- Activation de la connectivité étendue à faible consommation

Actility est dans une position unique pour fournir à la fois une connectivité basée sur le spectre sans licence avec **LoRaWAN** et un IoT LTE à spectre sous licence avec **NB-IoT et LTE-M** pour les fournisseurs de services ou les MVNO. Du soutien au déploiement de l'infrastructure radio, aux études de capacité du réseau, aux serveurs de réseau central LoRaWAN et aux solutions OSS / BSS, Actility fournit toutes les briques nécessaires pour une infrastructure réseau IoT évolutive et sécurisée.

- Gérez l'écosystème lors de l'embarquement et de l'adoption du marché

Parce que l'un des facteurs clés de succès des offres IoT est l'adoption de l'écosystème et du marché, la solution Actility est compatible avec tous les capteurs et passerelles conformes à la norme LoRaWAN. De plus, Actility fournit une série d'outils pour tester et certifier l'interopérabilité avec les solutions réseau Actility.

- Briser les barrières pour les déploiements à grande échelle

L'adoption à grande échelle des appareils IoT nécessite des solutions pour activer et gérer de grandes quantités de capteurs de manière simple et sécurisée. De plus, le déploiement d'appareils sur le terrain pendant 10 ans et plus nécessite la possibilité de mettre à jour le firmware de l'appareil pour faire face aux mises à jour de sécurité standard par exemple. Actility propose le stockage et la gestion des clés de sécurité des capteurs pour une activation sécurisée des appareils et une solution de mise à jour fiable du micrologiciel par liaison radio.

- Vers une monétisation de masse

L'IoT permet de nouveaux modèles commerciaux et de commercialisation disruptifs. Actility aide à créer des offres automatisées, à créer des moteurs, à assembler des appareils, une connectivité et des applications pour fournir des solutions complètes de bout en bout. De plus, Actility fournit un moteur de marketplace (qui peut être marqué blanc) pour aider les clients à trouver les solutions pour leurs cas d'utilisation.

- En assurant le maximum de sécurité

La sécurité est l'un des éléments clés de l'IoT. Bien que la norme LoRaWAN intègre des fonctionnalités de sécurité qui garantissent un haut niveau de sécurité, Actility ajoute des fonctionnalités supplémentaires qui permettent une sécurité de bout en bout avec des tunnels IPSec entre les passerelles et le serveur réseau, le stockage de clés sécurisé HSM côté serveur, Secure Élément intégration et serveurs de connexion dédiés.

KERLINK : concurrent d'ACTILITY situé aussi en Bretagne, mais beaucoup moins valorisé

Chute spectaculaire en bourse en 2019 (25€ à 2.5€ en oct. 2020)

Clients TATA communication, ACCORD, LEGRAND

Utilise principalement le réseau LORAWAN (privé et public)

SIGFOX : voir ci dessous

MULTITECH : le concurrent US des français KERLINK et ACTILITY chiffre d'affaires de l'ordre de 40 millions de dollars (2019)

VODAPHONE : 15 000 employés au total dont 1500 dédié à l'IOT

Peut proposer tous les réseaux et leur mise en place

SOGETREL : prend en charge l'installation physique de réseaux (par exemple les relais du réseau WIZE de SUEZ/GRDF)

- PERCALL
- VIVERIS

Intégrateurs/architectes/ distributeurs	Taille (employés)	C-A (2019) (M ^{ions} euros)	Cœur de Métier	Réseau utilisé
SFR business solutions	6600	10 000 (SFR)	Opérateur télécom / plateforme IOT	NB-IoT/M2M
ORANGE business services	66 755	22 000 (Orange)	Opérateur télécom /plateforme IOT	LTE-M / LORA/ M2M
OBJENIOUS	5500	6200 (Bouygues télécom)	Opérateur télécom / plateforme IOT	LORA / M2M
VODAPHONE	15 000 1500 IOT	1 000	Intégrateur /infrastructures	Tous
SIERRA WIRELESS	1400	713	Fabricant de passerelles routeur modem	tous
PERCALL	170	20	Ingénierie informatique	tous
VIVERIS	800	tbd	Ingénierie systèmes embarqués	tous
THE THINGS INDUSTRIES	25	1 à 10	The things network : Réseau communautaire basé sur LORA serveur reliant 4000 passerelles (universitaires) The things industries est une entreprise (25 pers C-A entre 1 et 10 millions) : intégrateur distributeur operateur	LORA
ADEUNIS	62	9	Ingénierie, spécialisé dans les émetteurs	LORA/Sigfox
CISCO	77 500	51 000	Equipements télécom (passerelles routeurs etc.)	
KERLINK	90	13	Fournisseur d'infrastructure télécom (passerelles etc.) IOT	
IOT factory			Distributeur fournisseur de plateforme IOT	Tout réseau
MIOS (SNEF)	40	7	Intégrateur IOT	
SOGETREL	4000	77	infrastructure	
SPIE	47 000	7 000	Energie et communication	
Airicom	12	3	Distributeur/architecte IOT	
RG2L	?	2.5	Distributeur/architecte IOT	
Bouygues énergies et services	?	?	Infrastructures Energie et télécom	
SPHINX	20	5.5 (2014)	Distributeur/architecte	
WIIO	47	12	Intégrateur IOT	
RTONE	33	3.5	Intégrateur IOT	
SOPRA STERIA	13 451	1 600	intégrateur	
4cadgroup	210	40	IoT industriel	
Synox	19	?	Facilitateur de projets IoT	
DATAprint		4.4	Distributeur de produit IOT	

Matooma	47	4.5	Intégrateur IOT	
ELA innovations	19	1.8 (2018)	RFID et bluetooth (consommation ultra faible)	
Actility	122	10	Infrastructure LORAWAN	
Cap Gemini	221 300	342	Services en informatique	
ATOS	120 000	13 000	Intégrateur / infrastructure expert cybersécurité IOT	
SUEZ smart solutions	250	47	La division « digital » de SUEZ	
Orisun-IOT	3	0.1	Intégrateur IOT	
IOTEROP	4		Developpement informatique /plateforme IOT/accompagnement IOT	

Tableau 15 comparatif integrateurs/distributeur/architectes chaine IOT complete ou partielle (RECORD 2021)

11.1.6 Les réseaux filaires

Les réseaux filaires se sont développés à partir de la disponibilité des automates programmables pour relier les nombreux actionneurs et capteurs dans le monde industriel (automobile, informatique, production etc.)

Chaque « grand » fabricant a développé son propre protocole réseau qui a donné lieu aux proliférations de connecteurs et de câbles différents et à des marchés spécifiques.

La réalisation d'un réseau de capteurs de différentes marques est un parcours du combattant puisqu'il est quasiment impossible de trouver sur les composants des protocoles identiques, et leur interfaçage parfois inexistant ou fastidieux à développer.

La disparition du RS232 sur les ordinateurs au profit de l'USB a un peu rebattu les cartes et les industriels ont été obligés de s'adapter en développant de nouvelles interfaces sur leurs produits. Les protocoles sont série ou parallèle, les câbles bifilaires ou multifilaires.

Certains domaines industriels restent néanmoins attachés aux protocoles en vigueur depuis plus de 30 ans (RS232 etc.).

La longueur possible d'un réseau filaire est directement liée au débit

- **Ethernet** : protocole d'échange entre ordinateurs et périphériques
- **GPIB** : protocole développé par HP (1965) pour ses instruments de mesure, des interfaces USB/GPIB permettent de se connecter avec les ordinateurs
- **RS232** : dit « port série », présent sur les ordinateurs jusqu'en 2005 (com1), connecteur 9 pins, 3 fils minimum, automates et capteurs en sont souvent équipés
- **RS485/422** : similaire au RS232, des convertisseurs RS232/RS485 existent
- **M BUS** : créé pour le relevé de compteur, peut atteindre plusieurs kilomètres
- **MODBUS** : protocole qui peut être implémenté sur les bus physiques RS232 RS485 ou TCP (internet wifi)
- **CAN** (controller area network) : bus lancé par l'université de Karlsruhe et Bosch, surtout utilisé dans l'automobile puis dans l'aéronautique (jusqu'à 5 km mais 10kBit/s à cette distance)
- **ASI** (actuateur sensors interface) 24 V bifilaire
- **PROFIBUS** (process field bus) : 1200 m maximum, bus en perte de vitesse
- **IO-LINK** : promu et utilisé par seulement quelques fabricants de capteurs et actionneurs
- **INTERBUS** : développé par une société US Phoenix contact
- **CPL** (courants porteurs en ligne) : utilise les lignes électriques pour transmettre des données (haut débit et bas débit) utilisé pour la domotique et la gestion de l'énergie (compteur linky)
-

11.1.7 Les réseaux satellitaires

L'intérêt majoritaire des réseaux satellitaires est de pouvoir fournir une **connectivité dans des zones non couvertes par des réseaux terrestres** comme par exemple les mers et océans. Ils n'ont pas vocation à concurrencer les réseaux terrestres.

Certains opérateurs proposent de **solutions combinées** : en cas d'absence de réseau terrestre le satellite prend le relais

Le satellite n'est pas sensible à la vitesse du mobile suivi

Une vingtaine de projets de constellations de satellites a vu le jour dernièrement dont :

- **KINEIS** : filiale de la société CLS (elle-même filiale du CNES),
 - évolution du système ARGOS de CLS connu pour ses balises de détresse en mer
 - Proof of concept : Suivi de 10 000 buffles en Australie (tag à l'oreille)
 - Module à 15 € et abonnement 3€/mois (1€/mois à terme)
 - Assez étonnant : une puissance d'émission de 100 mW suffit pour communiquer avec le satellite (5 fois moins que les satellites précédents)
 - Le 1^{er} satellite du service ANGELS a rejoint son orbite le 1/11/2020 (24 autres en préparation pour 2022) construit par Thales Alenia Space, HEMERIA et Syrlinks
- **Eutelsat : constellation ELO** de 25 satellites IoT à 500/600 km d'altitude, accord avec Sigfox (Total et Plastimo, fabricant de gilets de sauvetage, sont déjà clients)
- **Inmarsat** : 11 satellites de télécom en orbite géostationnaire, propose de prendre le relais du réseau LORAWAN (mais avec des systèmes nécessitant de la puissance dont une alimentation solaire de 80W)
- **Iridium** : principalement pour le téléphone cellulaire

- **Myriota** : australien, 25 satellites pour l'IOT
- Omnispace : projet US (peu d'informations disponibles)
- Roscosmos : projet russe de 30 satellites IOT
- **U-space** : start up française, nanosatellites sur mesure (3 kg) orbite 400 à 700 km durée de vie 3 ans
- Starlink (Elon Musk) : 400 satellites déjà en orbite destinés à l'internet haut débit
- Oneweb (avec Airbus) : constellation destinée à donner accès internet à tous (600 satellites à terme de 150kg à une orbite de 1200 km)
- **Swarm** : 12 sur 120 satellites IOT (400 **grammes**) lancés en orbite en 2020
- **Unseenlabs** : start up bretonne constellation à terme de 25 satellites de suivi des navires (km de précision 1 déjà en orbite 2 lancés en novembre 2020)

Tableau 16 propriétés des différents réseaux sans fil (RECORD 2021)

	Sigfox	lora	wise	W M-BUS	propriétaire	WI-SUN	GPRS/EDGE	2G/3G/4G/5G	LTE-M	eLTE-IoT	NB-IOT
type de réseau	LPWAN	LPWAN	LPWAN	LPWPAN	LPWAN	LPWAN	GSM	GSM	LPWAN/GSM	LPWAN/GSM	LPWAN/GSM
cible	IOT très faible débit	IOT débit moyen	IOT relevé compteurs	IOT relevé compteurs	IOT	IOT	données indus	voix données +	IOT	industriel IoT	IOT
Démarrage du développement	2009	2009	2012								
date du lancement commercial	2010	2015	2017								
durée de vie minimum annoncée	?	?	2045				2023				
propriétaires	Sigfox	LORA alliance	alliance WISE		TI Silicon labs STMicroelectronics		opérateurs GSM	opérateurs GSM	opérateurs GSM	huawei	opérateurs GSM
consortium créateur	Société unique	LORA alliance	SUEZ GRDF SAGEMCOM								
Taille de l'écosystème (sociétés)		500 >	40								
présence à l'international	60 pays	157 pays	Europe Afrique								
nombre d'opérateurs	1	137									
norme(s) du réseau	sans	sans	EN13757-4	EN13757-4 / EN 300-220		IEEE 802-15-4		3GPP			
protocole	propriétaire privé	LORAWAN	propriétaire ouvert	ouvert	propriétaire			GSM	LTE		NB-IOT
certification produit	Sigfox	oui	oui	non	non						
abonnement	Abonnement SIGFOX	abt ou sans abt	gratuit (mais adhésion)	sans	sans		abonnement	abonnement	abonnement	abonnement	abonnement
Possibilité de créer son réseau	non	soi-même ou tierce partie	soi-même ou tierce partie	soi-même ou tierce partie	oui						
sécurité (cryptage)	AES128 ?	AES128	AES128	AES128	AES128					AES128 embarqué	
Niveau de sécurité global											
IP adressable					oui						
forum d'entraide actif	oui		non		oui						
topologie du réseau	étoile d'étoile	étoile d'étoile	étoile		étoile						
bande de fréquences de la porteuse	868.034- >868.226 MHz	868/433 MHz	169,4- >169,475 MHz	169-433-868 MHz	Sub GHz				800 MHz (4G)		
nombre de canaux											
largeur de bande totale montante	195 kHz		75 kHz 6 canaux de 12.5 kHz						20-1.4MHz	1.8 MHz	200kHz
largeur de bande totale descendante										1.8 MHz	
largeur de bande descendante	100 ou 600 Hz	500-125kHz	12.5 kHz							30 kHz (54 canaux)	
largeur de bande montante										180 kHz (9 canaux)	
type de modulation	DBPSK/GFSK	CSS	GFSK 4FSK		(G)FSK/OOK						
débit de données		0.3 à 50kb/s	2400 à 6400 bits/s		600 bit/s a 250kbit/s				200kbps-1 M		20kb/s
puissance d'émission maximum (France)	25 mW	25mW	500 mW	25 à 500mW	25 à 500 mW						
puissance d'émission (en dB)	14 dB	14dB	27 dB		14 à 27 dB						
courant nécessaire à l'émission			400 à 700 mA		20mA à		2 A	2 A			

SUITE	Sigfox	lora	wise	W M-BUS	propriétaire	WI-SUN	GPRS/EDGE	2G/3G/4G/5G	LTE-M	eLTE-IoT	NB-IOT
données max par msg montant	12 octets	242 octets	256 octets (104 recommandés)								
données max par msg descendant	8 octets										
nombre de msg maximum par jour											
msg maxi montant par jour	140	Illimité (mais <1% duty cycle)	illimité								
msg maxi descendant par jour	4 (si possible)		illimité								
accès internet	oui	oui	oui				oui				
bidirectionnalité	faible		oui								
capteurs maximum par passerelle		50 à 1000									
opérateurs de télécom	Sigfox	Bouygues, orange, etc	SUEZ smart solution /GRDF								
cout d'une passerelle (accès IP)	700 €	700 à 1000 €									
temps maximum d'occupation /jour	36 s/h	36s/h									
messages descendant / jour	4										
localisation possible	oui	oui	non								
précision de la location	10 à 1 km	20 à 100 mètres									
transfert intercellulaire (d'un relais à un autre)	Oui	oui	non								
itinérance (roaming) entre opérateurs	oui	non	non								
cloud associé	Oui (imposé)		oui ?								
courant en veille des capteurs	6 nA				<μA		50mA	50mA			
autonomie annoncée des capteurs	10 ans	10 ans	20 ans		10 ans					10 ans	
portée annoncée	50 km	15 km	50km		10 km			3 km			
portée (urbain extérieur)	2 km	2-5 km			2 km (ant. élevée)						
portée intérieure bâtiments					100 mètres						
portée rural					2 km (ant. Elevée)						
récepteurs	maillage Sigfox	opérateurs ou passerelles	passerelles		Passerelles spécifiques		Relais opérateurs	Relais opérateurs	Relais opérateurs	Relais opérateurs	Relais opérateurs

	wifi	bluetooth	Z-WAVE	dash 7	thread	MIOTY	enocean	6LoWPAN	weightless	INGENU	KNX
type de réseau	LAN	LAN	868 MHz	433 MHz	IPv6/6LoWPAN	LPWAN	868MHz	IP over LPWAN	LPWAN	2.4 GHz	868 MHz
cible			domotique	généraliste	généraliste	industrie	domotique	généraliste	généraliste	M2M	bâtiment

autres réseaux (filaire et optiques)

	LI-FI	Fibre optiques	RFID	Faisceau optique	cpl courants porteurs	ethernet	CAN	MODBUS	RSxxx
principe	Lumière visible	Liaisons sur fibre optique	Sans fil	Point à point optique	filaire	filaire	filaire	filaire	filaire
Cible	télécommandes	Très haut débit Immunité aux perturbations	identification	Réseau temporaire	Domotique	Liaisons entre ordinateurs	Automobile Aéronautique industrie	industrie	industrie
Portée	10 m	1m à 10 000km	Quelques mètres	Quelques km	maison	10 m	30m à 5 km		
Nombre de fils		1			2	8	3		
Norme					G3-PLC		ISO 11898		
débit		44 Gbits/s		1 Gbits/s			10 kbits/s (5km) 1 Mbits/s (30 m)		
Nombre de capteurs par réseau	quelques	millions	1 par 1	milliers	milliers		20 à 30		

11.2 Retours d'expériences

Nous faisons figurer les projets impliquant l'utilisation de capteurs environnementaux dont on ne connaît pas toujours la nature des technologies de transmission. Ceci nous permet de mesurer malgré tout le foisonnement lié à ce sujet et la façon dont les données arrivent au niveau des citoyens, objectif ultime de la volonté politique.

Les banques de données environnementales (eau, air, sols) françaises et européennes seront mentionnées, sachant que les réseaux de capteurs environnementaux ont ou auront vocation à s'insérer dans ces systèmes publics bien établis.

11.2.1 Réseaux de mesure de la qualité de l'air

Les expériences européennes

- Airsenseur : projet européen d'open plateforme multi capteurs
 - https://www.lcsqa.org/system/files/evenement/4-MGerboles%20AirSensEUR_n.2_16_9-NE-PAS-DIFFUSER.pdf
- L'Europe a évaluée le micro capteurs ou systèmes micro capteurs :
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC116534/kjna29826enn.pdf>

Les expériences françaises

11.2.1.1 Le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air

Il est essentiellement défini et constitué par l'[Arrêté du 19 avril 2017 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant](#)

Ce texte fixe les missions confiées par l'Etat aux **AASQA**, au **LCSQA** et au consortium **PREV'AIR**. Il détermine également les prescriptions techniques applicables à la surveillance de la qualité de l'air ambiant.

- **Observatoire "MERA** : observatoire national d'évaluation en zone rurale de la pollution atmosphérique à longue distance ;
- **Plate-forme PREV'AIR** : plate-forme nationale de prévision et de cartographie de la qualité de l'air, développée et gérée par l'**Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)**, avec l'appui de **Météo-France**, du **Centre national de la recherche scientifique (CNRS)** et du **LCSQA**, dans le cadre d'un consortium ;
- **Programme "CARA"** : programme national visant à caractériser la composition chimique des particules ;
- **PRSQA** : programme régional de surveillance de la qualité de l'air

Les sites d'analyses des AASQA sont constitués principalement d'appareils de laboratoire dont le cout se situe au-delà de quelques keuros.

11.2.1.1.1 LCSQA

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Le laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air, organisme prévu à l'[article L. 221-1 du code de l'environnement](#) et précisé par l'arrêté du 19 avril 2017 correspondant à un groupement d'intérêt scientifique constitué de trois membres : l'Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques et le Laboratoire national de métrologie et d'essais.

Exemple d'action engagée par le LCSQA dans le domaine des capteurs environnementaux : Innovation et évaluation du micro capteurs :

« Depuis mars 2017, le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air s'est organisé autour d'un groupe **de travail (GT) sur les microcapteurs pour l'évaluation de la qualité de l'air**. Il réunit des membres du LCSQA, des représentants de chacune des AASQA et des membres du ministère chargés de l'environnement. Son périmètre d'action, limité initialement à la qualité de l'air ambiant extérieur, aux espèces chimiques réglementées et aux mesures en sites fixes, s'est élargi à d'autres besoins identifiés par les membres du GT, tels que la cartographie, les mesures embarquées, ou les polluants émergents, comme représenté sur le schéma. Ce GT a pour objectif de :

- définir les utilisations potentielles des microcapteurs pour la surveillance réglementaire ;

- identifier des applications émergentes pour des polluants d'intérêt national, et/ou pour d'autres modalités d'usage que la surveillance en points fixes ;
- organiser le partage d'expérience et le retour d'informations vers les utilisateurs potentiels pour mieux appréhender les modalités d'usage et d'accompagnement à mettre en place.

Ce GT a permis la création de la base de données Capt'air ; Un rapport de veille technologique sur [les capteurs et leur usage](#) est publié depuis décembre 2019 .

Au niveau international et par l'intermédiaire de ses membres, le LCSQA participe aux différentes instances européennes traitant de la surveillance de la qualité de l'air.

Ces dernières années les instances européennes se sont emparées de la problématique des microcapteurs. A ce titre, le LCSQA prend part aux discussions du groupe de normalisation européen CEN/TC 264/WG 42 en charge de la rédaction de spécifications techniques (TS) pour l'évaluation des performances des microcapteurs utilisés pour l'évaluation de la qualité de l'air en site fixe. Deux livrables de ce groupe de travail européen définissant les critères d'évaluation des microcapteurs pour leur utilisation dans un contexte réglementaire devaient paraître fin 2020 pour les gaz. En France en juillet 2020, l'Ineris et le LNE ont créé l'association CIE « Certification Instrumentation pour l'Environnement » afin d'établir une certification des systèmes capteurs pour la mesure de la qualité de l'air grâce aux travaux du groupe de normalisation. A l'horizon 2025 une même certification pour les particules devrait voir le jour. De même, le LCSQA apporte l'expérience française sur les microcapteurs dans les réseaux d'experts sur la mesure.

(<https://www.eea.europa.eu/themes/air/links/networks/aquila-network>) et la modélisation (forum FAIRMODE, <https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/>). »

« Réflexion sur l'intégration des données microcapteurs :

Les deux campagnes d'évaluation menées par le LCSQA ont été l'occasion d'étudier les modes de transmission et de récupération des données disponibles sur les différents systèmes présents afin d'entamer une réflexion sur les manières d'intégrer les données de microcapteurs dans la chaîne d'acquisition des données de la qualité de l'air. Les données issues des analyseurs automatiques qui transitent par la chaîne d'acquisition actuelle remontent selon un schéma relativement homogène, dans lequel sont définis **le format des données, un pas de temps unique, le format des fichiers d'échange, les supports et protocoles de communication...** Les modes de récupération des données issues des microcapteurs ainsi que leurs formats sont quant à eux multiples et il n'est pas simple d'imaginer par quel biais ces données peuvent être intégrées à la chaîne d'acquisition actuelle. Différentes possibilités ont été ainsi envisagées. La réflexion entamée par le LCSQA doit être poursuivie en fonction des usages qui seront définis par le GT selon les microcapteurs. Si l'utilisation des microcapteurs est retenue dans le cadre de la surveillance réglementaire, la question de l'intégration des données à la chaîne d'acquisition pourra devenir un critère de sélection. »

Le LCSQA a publié en novembre 2018 : [VEILLE TECHNOLOGIQUE SUR LES SYSTEMES MICRO-CAPTEURS POUR LES MESURES DE POLLUANTS DE L'AIR](#) (59 pages)

Un deuxième rapport de novembre 2018 : [1er Essai national d'Aptitude des microcapteurs \(EAμC\) pour la surveillance de la qualité de l'air : Synthèse des Résultats](#) qui nous apporte **un intéressant retour d'expérience sur les technologies sans fil** :

« Sur ces 17 systèmes, plus de 77% renvoient leurs données par des technologies sans fil, dont plus de la moitié par GSM (cf. Figure 6). En fonction du mode de communication, plusieurs problèmes ont été rencontrés durant l'EAμC n°1 : pour la communication par Bluetooth, Wifi ou en USB, il y a eu beaucoup de pertes de données en raison de problème d'émission/réception ou encore parce que les logiciels d'acquisition subissaient régulièrement des interruptions anormales (i.e. plantage informatique). Pour la communication par GSM, il est apparu des périodes entières de données manquantes, souvent en raison de pannes des serveurs hôtes »

Publications intéressantes

- <https://www.lcsqa.org/fr/actualite/evaluation-de-micro-capteurs-pour-la-qualite-de-lair>
- <https://www.lcsqa.org/fr/actualite/capteurs-et-qualite-de-lair-une-revolution-retour-sur-le-seminairedu->

lcsqa-du-23

- <https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/micro-capteurs-gaz-particules-surveillance-qualite-airpremier-essai-national>
- <https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/evaluation-micro-capteurs-qualite-air>
- Vidéo IMT Lille-Douai Essai d'aptitude national microcapteurs, mars 2019 : <https://www.youtube.com/watch?v=l-tTaFiMxjA&feature=youtu.be>

11.2.1.1.2 LES AASQA (ATMO)

Constituées dans les années 70, les associations sont présentes dans chaque région administrative de métropole et d'outre-mer y compris en Nouvelle-Calédonie (bien que la loi LAURE n'y soit pas appliquée).

Les missions

- Surveiller et prévoir l'air et l'atmosphère par des mesures, des modélisations (cartographies et scénarisations) et des inventaires (cadastres d'émissions air et énergie). Leur champ d'intervention couvre un large panel de polluants réglementés (particules, oxydes d'azote et de soufre, ozone, etc.) étendu aux gaz à effet de serre, à l'air intérieur, aux pesticides dans l'air, aux pollens, aux odeurs, etc.
- Informer et sensibiliser la population et les acteurs locaux au quotidien et en cas d'épisodes de pollution
- Accompagner les décideurs par l'évaluation des actions de lutte contre la pollution de l'air et de réduction de l'exposition de la population à la pollution de l'air
- Améliorer les connaissances et participer aux expérimentations innovantes sur les territoires.
-

L'Etat confie également aux AASQA des missions relatives au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant fixe que l'on retrouve dans l'article 3 de l'arrêté du 17 juillet 2019:

1. Surveiller et évaluer la qualité de l'air ambiant pour les polluants réglementés.
2. Prévoir la qualité de l'air pour les polluants concernés par l'arrêté du 7 avril 2016 modifié susvisé.
3. Informer quotidiennement les préfets sur la qualité de l'air observée et prévisible, en cas d'épisode de pollution atmosphérique ; les alerter en cas d'identification d'un épisode de pollution atmosphérique pouvant être consécutif à un incident ou accident technologique ;
4. Informer quotidiennement le public sur la qualité de l'air observée et prévisible, relayer, le cas échéant sur délégation du préfet, les informations et recommandations préfectorales relatives aux épisodes de pollution ou à un incident ou accident technologique susceptible d'avoir un impact sur la qualité de l'air.
5. Mettre à la disposition des préfets des éléments sur la qualité de l'air pour les porter-à-connaissance prévus à l'article L. 132-2 du Code de l'Urbanisme.
6. Fournir, gratuitement et librement, au LCSQA et au consortium PRÉV'AIR les informations requises par le ministère chargé de l'Environnement pour leur permettre d'assurer leurs missions en application du présent arrêté.
7. Réaliser un Inventaire régional spatialisé des émissions primaires des polluants atmosphériques mentionnés à l'article R. 221-1 du Code de l'Environnement et de leurs précurseurs.
8. Pour les régions concernées, évaluer l'impact sur la qualité de l'air ambiant des réductions d'émissions de polluants atmosphériques générées par les Plans de Protection de l'Atmosphère définis à l'article L. 222-4 du Code de l'Environnement, lors de leur élaboration, évaluation ou révision.
9. Pour les régions concernées, contribuer au programme CARA (Caractérisation chimique des particules), à l'observatoire MERA (dispositif national de mesure et d'évaluation en zone rurale de la pollution atmosphérique à longue distance) et à la surveillance des polluants d'intérêt national.
- 10.

Spécificités des AASQA

- Ce sont des organismes de type associatif, agréés par l'État
- Leur gouvernance est quadripartite (État, Collectivités, Entreprises, Associations et personnalités qualifiées santé/environnement)

- Leur financement est diversifié (État, Collectivités, Entreprises via des dons libératoires de Taxes Générales sur les Activités Polluantes), ce qui garantit leur neutralité et leur indépendance.
- Leur ancrage territorial les place au plus près des acteurs locaux, dont les collectivités territoriales, et en font des lieux uniques pour des diagnostics partagés et des actions concertées sur la qualité de l'air à l'échelle d'une région
- Les informations qu'elles produisent sont des données de référence, fiables et transparentes, les indicateurs qu'elles établissent le sont de façon homogène sur l'ensemble du territoire national
- Leur approche est transversale sur les enjeux croisés air/climat/énergie et couvre la qualité de l'air extérieur et intérieur.



Figure 27 mission des ATMOs (ATMO France)

11.2.1.1.3 AIRLAB

C'est un projet d'AIRPARIF : « une structure dont l'ambition est de favoriser l'émergence et l'accompagnement de projets innovants apportant des réponses concrètes à la problématique de la qualité de l'air. »

AIRLAB est placé sous l'autorité du Conseil d'Administration d'Airparif. Il est doté d'un comité stratégique pour définir et prioriser les orientations et d'un comité de pilotage pour assurer la sélection et le suivi des projets.

Les objectifs d'AIRLAB

- Guichet pour les initiatives innovantes
- Porteur d'appel à projet QA & QAI
- Gestionnaire de territoires d'expérimentation
- Ecosystème de partage des données
- Lieu de partage et d'échanges pour la communauté des utilisateurs
- Valorisation des partenaires et des utilisateurs
- Evaluation systématique des solutions portées par le AIRLAB
- Portage opérationnel de solutions
- Valorisations des solutions issues du AIRLAB
- Coordination avec les autres lab et pôles de compétitivité

En Janvier 2020 : (extrait du site d'airlab)

« [Un appel d'offre](#) vient d'être lancé pour réaliser des mesures de plusieurs polluants par le biais de microcapteurs embarqués sur une flotte de véhicules qui sillonnera la région et mieux connaître la perception et les attentes des Franciliens en matière de qualité de l'air

Cette expérimentation inédite par son ampleur, sera déployée sur l'Île de France, pilotée par Airlab avec le soutien du Conseil régional d'Île-de-France.

Les données ainsi collectées permettront d'affiner notre connaissance des sources de pollution en Île de France et contribueront à l'accompagnement des pouvoirs publics dans leurs plans d'actions pour lutter contre la pollution atmosphérique.

11.2.1.1.4 ATMO-France

En 2000, les AASQA ont créé la Fédération Atmo France pour les représenter au niveau national et partager expertise et moyens. Atmo France poursuit un objectif d'intérêt général : contribuer, aux côtés des autres acteurs nationaux, à doter la France d'un dispositif assurant la surveillance de la qualité de l'air et l'évaluation des actions visant à l'améliorer »

Les adhérents de la Fédération sont les 18 Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA – 1 par région administrative de métropole et d'outre-mer) et 1 Association de surveillance de la qualité de l'air (ASQA) située en Nouvelle-Calédonie.

Les réseaux de capteurs des AASQA

Un total d'environ 800 stations de mesures des AASQA couvre la France donc 45 par laboratoire ATMO. En grande majorité constitué d'appareils de laboratoire qui 'interfacent sur PC par liaison filaire ethernet. Les données sont engrangées dans une mémoire et rebasculées manuellement ou automatiquement dans un serveur central.

Les réseaux de capteurs environnementaux, pour les AASQA concernent principalement les microcapteurs en évaluation

La fiabilité de ces microcapteurs n'est pas encore suffisante pour pouvoir être agréés comme moyen de mesure officiel l'expérience réseau des AASQA se résume aux conclusions du [1er Essai national d'Aptitude des microcapteurs \(EAµC\) pour la surveillance de la qualité de l'air](#)

11.2.1.1.5 PREV'AIR

Le système national de modélisation et de cartographie de la qualité de l'air PREV'AIR contribue au dispositif de surveillance. Il a été mis en place en 2003. Il est géré par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) et résulte du travail d'un consortium intégrant à ses côtés, Météo France, le CNRS et le LCSQA (Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air). Il est basé sur le résultat de simulations numériques et d'observations recueillies sur le terrain pour prédire et cartographier les concentrations de polluants atmosphériques réglementés.

11.2.1.1.6 Programme PRIMEQUAL

C'est un programme de recherche inter organisme pour une meilleure qualité de l'air

Lancé en 1995 par le MTES et l'ADEME

275 actions de recherche soutenues pour 20 millions d'euros d'aide

11.2.1.1.7 Le Réseau National de Surveillance Aerobiologique (R.N.S.A.)

Association (loi de 1901), créée en 1996 pour poursuivre les travaux réalisés depuis 1985 par le Laboratoire d'Aérobiologie de l'Institut Pasteur à Paris.

Ce réseau a pour objet principal l'étude du contenu de l'air en particules biologiques pouvant avoir une incidence sur le risque allergique pour la population. C'est à dire l'étude du contenu de l'air en pollens et en moisissures ainsi que du recueil des données cliniques associées

Les capteurs des réseaux consistent en filtres aspirés, puis une observation sous microscope pour identifier le type de pollen. Les résultats sont remontés au siège lyonnais

11.2.1.2 Le programme COPERNICUS

Copernicus est le programme d'observation de la Terre de l'Union européenne. Il offre des services d'information basés sur l'observation de la Terre par **satellite et des données in situ (non spatiales)**.

Le programme est coordonné et géré par la Commission européenne. Il est mis en œuvre en partenariat avec les États membres, l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques (EUMETSAT), le Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF), les agences de l'UE (dont l'EEA) et Mercator Océan.

De vastes quantités de données mondiales provenant de satellites et de systèmes de mesure terrestres, aériens et maritimes sont utilisées pour fournir des informations afin d'aider les prestataires de services, les autorités publiques et les autres organisations internationales à améliorer la qualité de vie des citoyens européens. Les services d'informations fournis sont accessibles **gratuitement et librement** à ses utilisateurs.

Les services Copernicus s'appuient sur des mesures environnementales collectées à partir de systèmes de surveillance terrestres, maritimes ou aériens, ainsi que sur des références géo spatiales ou des données auxiliaires, collectivement appelées données «in situ».

Une large gamme d'infrastructures de surveillance in situ, chacune créée pour servir un certain nombre d'objectifs différents et divers, est utilisée par le programme Copernicus afin de produire, enrichir et valider ses services, en améliorant leur précision et leur fiabilité.

Cela comprend des capteurs placés sur les rives des rivières, transportés par des ballons météorologiques ou des avions, tirés à travers la mer par des navires et dérivant dans l'océan sur des flotteurs ou des bouées. Il englobe également les données collectées par des drones ou par des citoyens scientifiques.

Les données sur l'environnement physique sont collectées depuis des siècles et, par conséquent, il existe une grande variété et une large gamme de réseaux et de parties prenantes impliqués dans la collecte et la gestion de ces données.

Le volet Copernicus in situ analyse actuellement les besoins, les lacunes dans les données et les défis liés à l'acquisition ou à l'accès aux données d'observation in situ pour le programme Copernicus. Ces travaux sont menés dans quatre domaines thématiques, dont plusieurs sont transversaux aux besoins des services Copernicus :

- Météorologie
- Océanographie
- Composition atmosphérique et qualité de l'air
- Climat

.ci joint un tableau résumant les paramètres de surveillance par type de domaine

Tableau 17 les missions de COPERNICUS

Domaine	paramètres
Météorologie	Données historiques et en temps réel • Sol : données de la station météo (température, précipitations, humidité relative, vent, UV solaire, etc.) • Profils atmosphériques : température, vent, humidité.

	Données historiques sur le climat ; séries chronologiques harmonisées
Océanographie	<ul style="list-style-type: none"> • Physique : température, salinité, courants océaniques, hauteur de la surface de la mer, glace de mer et profondeur des couches mixtes. • Biologique : chlorophylle, oxygène dissous, nutriments et micro-nutriments, par ex. fer, production primaire et dans les cas régionaux zooplancton, flux radiatif et méthane.
Composition atmosphérique	<ul style="list-style-type: none"> • Concentrations des principaux polluants atmosphériques (NOx, PM10, PM2.5, CO, SO2, HCHO, Pb, TSP, C6H6) • Composition chimique en aérosol à résolution dimensionnelle • Concentrations de gaz à effet de serre (CO2, CH4 et N2O) • Données de concentration à résolution verticale des gaz polluants et des aérosols
Terrestre	Débit fluvial, Utilisation de l'eau, Eaux souterraines, Lacs, Couverture neigeuse, Glaciers et calottes glaciaires, Inlandsis, Pergélisol, Albédo, Couverture terrestre (y compris le type de végétation), Fraction de rayonnement photosynthétique actif absorbé (FAPAR), Indice de surface foliaire (LAI), Biomasse aérienne, carbone du sol, perturbation par le feu, humidité du sol.

Pour les mesures d'environnement le dernier satellite lancé en 2017 SENTINEL 5 UV/NS

La mission Sentinel-5 se concentre sur la surveillance des concentrations de gaz traces et des aérosols dans l'atmosphère pour soutenir les services opérationnels couvrant les applications de qualité de l'air en temps quasi réel, la surveillance du protocole de qualité de l'air et la surveillance du protocole climatique.

L'instrument Sentinel-5 / UVNS est un système de spectromètre haute résolution fonctionnant dans la gamme infrarouge ultraviolet à ondes courtes avec 7 bandes spectrales différentes : UV-1 (270-300 nm), UV-2 (300-370 nm), VIS (370-500 nm)), NIR-1 (685-710nm), NIR-2 (755-773nm), SWIR-1 (1590-1675nm) et SWIR-3 (2305-2385nm). Sa résolution spatiale est inférieure à 8 km pour les longueurs d'onde supérieures à 300 nm et inférieure à 50 km pour les longueurs d'onde inférieures à 300 nm.

Durée de vie de la mission : 7,5 ans

Objectifs de la mission : Mesures de la qualité de l'air

- Surveillance de l'ozone stratosphérique
- Mesures de rayonnement solaire
- Surveillance du climat

Hauteur de l'orbite : 817 km

Cycle de répétition : 29 jours

Les principaux produits de données seront O3, NO2, SO2, HCHO, CO, CH4 et la profondeur optique des aérosols.

Airbus Defence & Space (Ottobrunn) est le maître d'œuvre de l'instrument Sentinel-5 / UVNS.

AVIS : la résolution spatiale de 8km (carré de 8x8 km) ne permet pas de faire une analyse localisée et d'identifier les sources de pollution. C'est une mesure globale de pollution diffuse au niveau des pays. La très forte profondeur de champ ne permet pas de définir à quelle altitude se trouve la pollution, (l'intégration se fait sur une hauteur de 0 à 5000 mètres).

Réseaux nationaux et internationaux

De nombreuses sources de données in situ sont détenues et exploitées par des institutions et des agences au niveau national. Un bon exemple est les données nationales de surveillance de la qualité de l'air collectées par certains services météorologiques nationaux (NMS), que les États membres de l'UE sont tenus de signaler à l'Agence européenne pour l'environnement. Les cartes et les données

gérées par les agences nationales de cartographie et cadastrales (NMCA) des États membres en sont un autre exemple.

Une quantité croissante de données in situ provient des infrastructures de recherche et d'autres collaborations internationales, telles que la Commission technique mixte d'océanographie et de météorologie maritime (JCOMM), un organisme intergouvernemental réunissant l'expertise et les capacités technologiques de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO.

Des données de l'environnement sont accessibles gratuitement et exploitables avec des programmes de type MATLAB, depuis le site

https://www.regional.atmosphere.copernicus.eu/?category=data_access

Les réseaux de recherche scientifique servent également souvent de sources de données in situ précieuses pour le programme Copernicus.

Un grand nombre d'entre eux existent en Europe, dont certains sont financés en tant qu'infrastructures européennes de recherche (IR). Dans le domaine de l'environnement, ils coordonnent les efforts et le développement de projets-cadres comme ENVRIplus. Des exemples de ces IR comprennent :

- Integrated Carbon Observation System (ICOS), une infrastructure de recherche paneuropéenne qui fournit des données harmonisées et de haute précision sur le cycle du carbone, le bilan des gaz à effet de serre et leurs perturbations.
- Avions en service pour un système mondial d'observation (IAGOS), une infrastructure de recherche européenne pour les observations mondiales de la composition atmosphérique à partir d'avions commerciaux.
- ACTRIS, l'infrastructure européenne de recherche pour l'observation des aérosols, des nuages et des gaz traces
- European Plate Observing System (EPOS), fournit des données pour des sciences de la Terre solides afin de soutenir une société sûre et durable
- EuroArgo, un consortium européen d'infrastructures de recherche (ERIC) axé sur la fourniture de la composante européenne du programme de flotteurs de profilage Global Argo.
- EMSO, l'observatoire européen multidisciplinaire des fonds marins et des colonnes d'eau, également un ERIC, axé sur les plates-formes océanographiques et les fonds marins fixes pour l'observation des océans (y compris certains observatoires câblés).

11.2.1.3 Retour d'expérience de la SNCF

Au sein de l'Agence d'Essai Ferroviaire (et EURAILTEST GIE avec RATP) une équipe est chargée d'orchestrer les mesures de paramètres environnementaux :

MESURES CONCERNEES

Problématique dans les gares, tunnels, mesures des concentrations en particules fines (PM 2.5 et PM10) d'intérêt sanitaires ainsi que mesures des concentrations de gaz tels le NO, NO2, CO lors de travaux

Problématique sur les rames : mesures des concentrations gaz de la qualité de l'air intérieur (COV, Formaldéhyde, CO2, etc.) ainsi que mesures des concentrations en particules fines (PM10 et PM 2.5) et odeurs susceptibles d'incommoder les clients (nez électroniques, H2S, NH3)

problématique sur les bureaux : mesures des concentrations gaz de la qualité de l'air intérieur (COV, Formaldéhyde, CO2.) + Odeurs susceptibles d'incommoder nos clients (nez électroniques, H2S, NH3)

TRAITEMENT DES DONNEES

La SNCF étudie la faisabilité de rapatrier toutes ses données sur une interface commune de façon automatique avec un pas de temps de mesure identique pour tous les capteurs. Le type de transmission peut être LORA, Sigfox, GSM, MODBUS...

Le but de cette étude est de diminuer le temps de traitement, de centraliser les données et de pouvoir comparer directement les instruments de mesures entre eux. De plus, il serait possible de corrélérer avec d'autres données (la vidéo surveillance par exemple) afin de les assister dans l'interprétation et la compréhension des résultats

11.2.1.4 Retour d'expérience de la RATP

Le réseau SQUALES (Surveillance de la qualité de l'air de l'environnement souterrain) a été mis en place en 1997, il concerne l'instrumentation fixe de 3 stations (2 métros 1 RER) :

- deux stations de métro, Franklin D. Roosevelt (ligne 1) et Châtelet (ligne 4), et une gare du RER, Auber (ligne A) sont équipées d'appareils de mesures. Ces mesures portent sur les paramètres climatiques usuels (température, humidité relative), le renouvellement d'air (dioxyde de carbone) et la qualité de l'air (oxydes d'azote, particules).
- Les citoyens peuvent consulter les données sur : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/qualite-de-lair-mesuree-dans-la-station-chatelet/>

Concernant le système de transmission des mesures La RATP a bien voulu nous communiquer les informations suivantes :

- La RATP utilise actuellement du réseau filaire ou du 3G/4G.
- Les réseaux Lora et Sigfox ne sont pas compatibles avec le matériel utilisé ni avec la quantité de données à transmettre. De plus, ces réseaux ne captent pas en souterrain sans la mise en place de répéteurs ils ne sont donc pas adaptés à leur besoin.

Des campagnes de mesures sont réalisées sporadiquement (mais ne concernent pas les réseaux de capteurs).

Nous citerons malgré tout une expérience réalisée par le laboratoire LPC2 (CNRS) sur la mesure des particules ultrafines :

En juin 2019, le Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace (LPCE2) du CNRS, avec l'association Respire, ont mené une série de mesures des particules ultrafines (jusqu'à 0,2 µm) dans les enceintes du métro et du RER avec un appareil de haute précision, le [LOAC](#).

Les premiers [résultats de cette étude inédite](#) sont des concentrations considérables jamais mesurées à l'extérieur.

De même l'ORS Ile de France, observatoire régional de la santé) : https://www.ors-idf.org/fileadmin/DataStorageKit/ORS/Etudes/Etude_1582/Synthese_pollution_enceintes_souterraines_web_1_.pdf mentionne la nécessité de faire des mesures à plusieurs endroits différents d'une même station

11.2.2 Réseau de mesure de la qualité des eaux

Réseaux d'informations environnementales européennes

- [EIONET](#) (european environment information and observation network) commun à l'air l'eau le bruit
- [Eionet](#) France
- WISE est un partenariat entre la Commission européenne (DG Environnement, Centre commun de recherche et Eurostat) et l'Agence européenne pour l'environnement, connu comme le «Groupe des quatre» (Gd4). Les principaux rôles et responsabilités des partenaires sont les suivants :
 - La [DG Environnement](#), dirige la politique et l'aspect stratégique de WISE
 - L'[Agence Européenne de l'Environnement](#) (AEE) qui héberge le centre de données (Data center) et les pages thématiques de WISE.
 - Le [Centre Commun de Recherche](#) d'Ispra (CCR) qui prend en charge les aspects observation et modélisation, incluant la prévision.

- Eurostat qui collecte et diffuse des statistiques, apporte un soutien au développement des aspects SIG de WISE (en assurant aussi le lien avec la directive INSPIRE).

11.2.2.1 Les banque de données et sources d'informations publiques sur l'eau

Les sites du Ministère de la transition écologique et solidaire

- [vigicrues](#) : système de 1500 points de mesure (niveau et parfois débit) pour la prévention et l'information des crues

Le portail eaufrance, <https://www.eaufrance.fr/>, est le site public d'information sur l'eau

Il présente des chiffres-clés sur l'eau, sélectionnés selon différentes thématiques. D'autres chiffres repères sur l'eau et les milieux aquatiques sont présentés sous forme de graphiques dans un dossier thématique.

- SIE : Le Système d'Information sur l'Eau (<https://www.eaufrance.fr/le-systeme-dinformation-sur-leau-sie>) est un dispositif créé par l'État pour le partage et la mise à disposition des données sur l'eau du secteur public.
 - Les données du SIE
 - Les données du SIE concernent la ressource en eau, les milieux aquatiques, leurs usages ainsi que les services publics d'eau et d'assainissement, pour la France métropolitaine et les départements d'outre-mer.
 - Le SIE a été introduit dans le code de l'environnement ([article L213-2](#)) par la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006.
 - Les objectifs du SIE
 - La vérification de la conformité de la mise en œuvre de la législation environnementale sur l'eau ;
 - L'analyse des pressions dues aux activités humaines, les analyses économiques et l'évaluation de l'état des eaux, sur la base d'une connaissance objective de l'état des milieux et des usages ;
 - L'évaluation de l'efficacité et de l'efficience des politiques publiques, notamment en ce qui concerne la performance des services publics d'eau et d'assainissement ;
 - L'aide à la décision, notamment pour la police de l'eau, la planification, la prise en compte des risques liés à l'eau dans les politiques d'aménagement, ou la gestion des crues et des sécheresses ;
 - L'information du public, en application de la Charte de l'environnement ;
 - La fourniture des données à d'autres systèmes d'information (santé, travail, risques, statistique publique, etc.) ;
 - La contribution, en particulier en matière de données patrimoniales, aux programmes de recherche appliquée.
- [SANDRE](http://www.sandre.eaufrance.fr/) (<http://www.sandre.eaufrance.fr/>) service d'administration nationale des données et des référentiels sur l'eau : les données remontent à ce service selon le format du SIE (système d'information de l'eau) :
 - Le Sandre a pour mission, d'établir et de mettre à disposition le *référentiel* * des données sur l'eau du *SIE* . Ce *référentiel* *, composé de spécifications techniques et de listes de codes libres d'utilisation, décrit les modalités d'échange des données sur l'eau à l'échelle de la France. D'un point de vue informatique, le Sandre garantit l'interopérabilité des *systèmes d'information* * relatifs à l'eau.
 - Le Sandre est organisé en un réseau d'organismes contributeurs au *SIE* * qui apportent leur connaissance métier, participent à l'administration du *référentiel* * et veillent à la cohérence de l'ensemble. Le *SNDE* *, complété par des documents techniques dont ceux du Sandre, doit être respecté par tous ses contributeurs, conformément au décret n° 2009-1543 du 11 décembre 2009.
 - Le Sandre comporte des administrateurs de données au sein des organismes contributeurs. Piloté par l'Office Français de la Biodiversité (OFB) , ce réseau s'appuie sur un secrétariat technique - assuré par l'Office International de l'Eau , qui anime, élabore et met à disposition ce *référentiel* *.

- Data eaufrance (<http://www.data.eaufrance.fr/>) est le site des données publiques sur l'eau en France.
 - Il offre un accès libre aux données sur l'eau, les milieux aquatiques et leurs usages, publiées sur les sites de la toile eaufrance. Ces données sont proposées gratuitement, dans des formats électroniques exploitables, et sous licence ouverte. Elles sont accompagnées de métadonnées (description de la donnée) qui les rendent facilement exploitables ; elles peuvent ainsi être analysées, agrégées, comparées avec d'autres données et réutilisées pour des besoins spécifiques par les acteurs de l'eau, les collectivités locales, les entreprises, les scientifiques, les associations, les citoyens ou les journalistes
 -
- cartograph : <http://www.cartograph.eaufrance.fr/>
- SEEE eaux (<http://seee.eaufrance.fr/>) : Système d'évaluation de l'état des eaux
 - Le Système d'évaluation de l'état des eaux (SEEE) est accessible librement – aucune authentification requise – pour permettre la mise à disposition des algorithmes de référence ainsi que l'exécution de calculs depuis une interface web – interrogation également possible en API – exploitant ces algorithmes sur la base de fichiers d'entrée et de sortie standardisés.
- Banque HYDRO : <http://hydro.eaufrance.fr/> : (administrée par le SCHAPI à Toulouse

HYDRO stocke les mesures de hauteur d'eau (à pas de temps variable) en provenance d'environ 5000 stations de mesure (dont environ 3200 sont actuellement en service) implantées sur les cours d'eau français et permet un accès aux données signalétiques des stations (finalité, localisation précise, qualité des mesures, historique, données disponibles...). HYDRO calcule sur une station donnée les débits instantanés, journaliers, mensuels,... à partir des valeurs de hauteur d'eau et des courbes de tarage (relations entre les hauteurs et les débits). Ces valeurs sont actualisées à chaque mise à jour d'une hauteur ou d'une courbe de tarage (addition, précision supplémentaire, correction,...).

HYDRO fournit à tout moment les valeurs d'écoulement les plus exactes possibles compte tenu des informations que les gestionnaires des stations lui communiquent.

Qui fournit les données à la Banque Hydro ?

Il s'agit essentiellement des services de l'Etat, Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), Direction Départementale des Territoires (DDT), services de prévision des crues, directions départementales de l'agriculture et de la forêt, agences de l'eau, mais aussi d'Électricité de France ou d'organismes de recherche (INREA, universités,...), ainsi que des compagnies d'aménagement (la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne, la Compagnie nationale du Rhône, la Société du canal de Provence, la Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône-Languedoc...).

Ces producteurs de données installent les stations de mesure en rivière, assurent leur maintenance, recueillent les données, les vérifient et en alimentent la banque. Ils réalisent des jaugeages au droit des stations de mesure et établissent les courbes de tarage qui figurent également dans la banque. Ensuite, ils valident, et éventuellement corrigent les données. Ils en sont responsables et veillent à leur qualité.

SCHAPI : Le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (service du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie) implanté à Toulouse, administre la banque et gère les services associés à HYDRO. Il en assure également les évolutions.

Le réseau de mesure (3200 stations en service) utilisé par le SCHAPI pour prévoir les crues (informations du SCHAPI) :

- Réseau cellulaire IP privé (GPRS, 3G, 4G) 66%
- Le reste : ADLS, satellites, internet hertzien (IP privé), RTC (réseau téléphonique fixe avec modem supprimé en 2023) en cours de basculement vers le réseau cellulaire IP (

- Sur les cours d'eau les plus réactifs (changements brusques) des systèmes radio propriétaires
 - LORA et LTE-M seront testés à partir de 2021
 - En Guyane les satellites ARGOS sont utilisés
- Onde : <https://onde.eaufrance.fr/> Le site Onde présente les données de l'observatoire national des étiages (niveaux bas des cours d'eau). Ces données sont **les observations visuelles** réalisées par les agents départementaux de l'Office français de la biodiversité (OFB) pendant la période estivale sur l'écoulement des cours d'eau.
 - ADES : <https://ades.eaufrance.fr/> **ADES** est le portail national d'**Accès aux Données sur les Eaux Souterraines** pour la France métropolitaine et les départements d'outre-mer. Il rassemble sur un site Internet public des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines. Les objectifs de cet outil sont de :

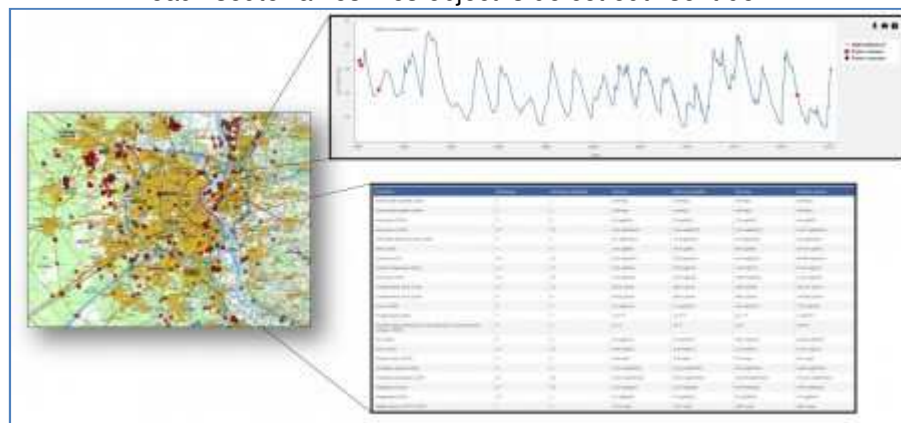


Figure 28 copie d'écran du portail sur la qualité des eaux souterraines

- constituer un outil de collecte et de conservation des données sur les eaux souterraines,
- être mobilisable par un large ensemble de partenaires,
- permettre les traitements nécessaires à l'action de chacun des partenaires,
- être le guichet d'accès aux informations sur les eaux souterraines,
- avoir un suivi de l'état des ressources pour répondre à la politique des eaux souterraines,
- adopter au niveau national un principe de transparence et d'accessibilité aux données sur les eaux souterraines.

Le portail d'accès aux données sur les eaux souterraines est le fruit d'un travail collectif associant **l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB), le ministère en charge de l'écologie, le ministère en charge de la santé, les Agences de l'eau et les DREAL**. Son développement informatique, l'animation nationale, et l'hébergement sont confiés au **BRGM**.

La traçabilité des données du producteur à l'utilisateur garantit un bon niveau d'informations pour une meilleure utilisation et interprétation des données consultées, conformément aux préconisations du Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau (**SANDRE**) : origine des données, indication du niveau de validité des données...

RCS (réseau de surveillance des eaux douces de surface) :

Le réseau de contrôle de surveillance (RCS) des eaux douces de surface concerne les cours d'eau, les canaux et les plans d'eau. Il est destiné à évaluer l'état général des eaux et à suivre les changements à long terme de l'état des eaux suite à des changements d'origines naturelle ou anthropique. Il est constitué de sites pérennes répartis sur l'ensemble du territoire.

Il est opérationnel depuis janvier 2007. En région Centre-Val de Loire il est constitué de 94 stations sur cours d'eau qui font l'objet chaque année de suivis physico-chimiques et biologiques conformément à l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant un programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement. Les suivis sont détaillés dans le programme de surveillance du bassin Loire-Bretagne et dans celui du bassin Seine-Normandie. Ce réseau est géré par les agences de l'eau Loire-Bretagne et Seine-Normandie en partenariat avec la DREAL, l'ONEMA et les conseils généraux des départements du Cher, de l'Eure-et-Loir, de l'Indre-et-Loire, du Loir-et-Cher et du Loiret.

RCO : réseau de contrôles opérationnels (depuis 2009) surveillance des masses d'eau risquant de ne pas atteindre le niveau de qualité prévu dans (RNAOE)

RPP : réseau de référence pérenne 345 sites cours d'eau

RDSE : recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau

RSP : Le Réseau national de Surveillance Prospective a été mis en place depuis 2016 sous le patronage du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et le pilotage conjoint des Agences de l'Eau et de l'Agence Française pour la Biodiversité. Il répond à l'objectif d'anticipation assigné au contrôle de surveillance de la Directive Cadre sur l'Eau. Il s'agit d'un ensemble de sites sur lesquels sont identifiées de nouvelles substances et sont menées des études de démonstration sur la pertinence de nouveaux outils pour la surveillance de la contamination et des pressions chimiques. Par exemple les échantillonneurs intégratifs passifs (EIP)

Les analyses sont faites par des laboratoires agréés iso 17025 sur des échantillons prélevés

Autre source d'information sur l'eau :

- <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/eaux/eau#Resultats-du-contrôle-sanitaire-de-la-qualité-de-l-eau-potable-en-ligne-nbsp>

11.2.3 Exemple d'un Réseau de surveillance de la qualité des cours d'eau du bassin Adour Garonne :

La qualité de l'eau des principales rivières du bassin Adour-Garonne est régulièrement mesurée dans le cadre de réseaux mis en place depuis 1971.

Pour répondre au besoin de contrôle exigé par la Directive Cadre sur l'Eau ces réseaux ont évolué vers le réseau de surveillance de la qualité.

11.2.3.1 Les acteurs de la surveillance sur le bassin :

Les rôles et responsabilités de chacun des acteurs (services de l'Etat et ses établissements publics) intervenant dans les réseaux de surveillance sont définis dans le Schéma national des données sur l'eau (SNDE), approuvé par l'arrêté du 26 juillet 2010. Sous pilotage du secrétariat technique de bassin, sont ainsi responsables :

- les services de l'Etat ([DREAL](#) , [SCHAPI](#)), pour les suivis quantitatifs des eaux continentales,
- l' [OFB](#) (office français pour la biodiversité), pour les suivis des poissons et hydromorphologique des [Eaux de surface](#) continentales,
- l' [Agence de l'eau](#) , pour les suivis de la qualité physico-chimique et biologique des eaux continentales et du littoral.

Pour les prélèvements et analyses, cette surveillance s'appuie sur :

- des équipes en régie des services de l'Etat (DREAL) et de l'AFB (ex [ONEMA](#)),
- des opérateurs de l'Etat ([BRGM](#) , [IRSTEA](#) , [IFREMER](#) ...),
- des prestataires privés et laboratoires publics par appels d'offres, sous maîtrise d'ouvrage agence de l'eau et AFB,
- des partenaires (conseils départementaux, syndicats mixtes, [EPTB](#) , parcs naturels régionaux, fédérations de pêche...), maîtres d'ouvrage de réseaux complémentaires.

Données complémentaires :

- Données du Contrôle sanitaire des eaux de baignade : [Sise-Baignade](#)
- Données sur l'[Icthyofaune](#) (poissons et macrofaune) par le portail de l'AFB : [IMAGE](#)
- Les informations sur les eaux distribuées par les réseaux d'eau potable :
 - [Eau potable et contrôles sanitaire sur le site du ministère de la santé](#)
 - [Agences régionales de santé](#) (A.R.S.)

Documents de référence :

- Circulaire DCE 2006/16 du 13 juillet 2006 relative à la constitution et la mise en œuvre du [Programme de surveillance](#)

- [Description des programmes de surveillance pour la DCE sur le portail Eaufrance](#)
- Les données d'[état, pression, objectifs](#) définis par les [SDAGE](#) 2016-2021.

Voir aussi :

- Site destiné aux laboratoires qui souhaitent obtenir l'agrément pour les analyses dans le domaine de l'eau et des [Milieux aquatiques](#).

Exemple de suivi des eaux de la Loire au niveau de l'estuaire : <http://www.loire-estuaire.org/accueil/gip-loire-estuaire>

11.2.4 La télérelève des compteurs (eau gaz)

C'est un sujet qui concerne les 3 principaux acteurs de la distribution d'eau potable en France (Veolia, Suez, Saur).

Ces sociétés utilisent à la fois des sociétés externes et des services internet (issus par exemple de sociétés proposant déjà des solutions).

La tendance est au souhait de rendre public des solutions propriétaires en créant des alliances devant déboucher sur des standards

2 technologies sans fils ont été déployées au début des années 2000 : 169 MHz pour sa longue portée et sa profondeur de pénétration et le 868 MHz (bande publique) pour la disponibilité des circuits et ses technologies propriétaires bon marché (ex : Texas instruments)

11.2.4.1 Veolia :

Veolia eau utilise la technologie développée par les sociétés Homerider systems (rachetée en 2009 par Veolia) et devenu BIRDZ par fusion avec M2ocity.

Gérer à distance les consommations d'énergie d'un bâtiment ou aux groupes gaziers et pétroliers de contrôler les niveaux de leurs cuves de stockage via des capteurs collecteurs et transmetteurs de données

BIRDZ revendique 6 millions d'objets connectés

- Gestion de la consommation d'eau
- Gestion des fuites sur les réseaux d'eau
- Contrôle de niveaux de cuves
- Gestion de la consommation énergétique
- Smart City (eau, énergies, déchets, température, qualité de l'air, nuisances sonores, pollution)...

M2ocity a commencé avec Orange en 2011 dans la bande 868 MHz en utilisant la technologie propriétaire 868Mhz wavenis de Coronis systems (Montpellier) en réseau étoile ou maillé, assurant jusqu'à 10 ans d'autonomie.

BIRDZ développe des produits pouvant s'adapter aux compteurs du marché (ex : Itron) et multiprotocoles sans fil (LORA, Sigfox, Homerider)

Veolia travaille aussi avec IBM et propose un system complet de supervision (hypervision) dénommé HUBLO.

Lyon et Lille sont équipées

A Lyon 5500 sondes enterrées à 2 mètres permettent de détecter et localiser les fuites. La partie émettrice est ramenée à la surface

11.2.4.2 Suez:

Suez smart solutions filiale du groupe Suez, précédemment Ondeo systems créées en 2009, a en charge l'IoT, la smart city, la télé relevé (170 ingénieurs). A déjà livré 2.4 millions de capteurs et 500 collectivités

Utilise le réseau WIZE, dont les passerelles sont fabriquées par SAGEMCOM.

11.2.4.3 Saur

Propose 2 types de transmission sans fil pour lire les compteurs d'eau de ses abonnés

- Télérelève : les données sont envoyées vers un concentrateur (passerelle)
- Radio relève : une voiture passe dans les quartiers et effectue un télérelevé

11.2.5 Réseaux de mesure de la qualité des sols

- <http://ssp-infoterre.brgm.fr/>
- <https://basol.developpement-durable.gouv.fr/>
- <http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/pollution-des-sols-sis-et-anciens-sites-industriels>
- <https://comrisk.fr/> **Dans l'évaluation et la gestion d'un site pollué, le dialogue avec les populations permet une gestion du site de meilleure qualité, plus complète, répondant mieux aux attentes, et ainsi plus durable.** Ce site propose à tous les acteurs des informations, une démarche, des méthodes, des outils et des supports, pour la conception, l'organisation et la mise en œuvre de ce dialogue

La thèse de Frédéric Portet (2004) « [MONITORING CONTINU DE SITE POLLUE Mise au point d'une méthodologie de contrôle en continu d'un site pollué en phase de surveillance ou de dépollution](#) » préconise chaudement l'utilisation du GSM pour l'envoi de donnée sur internet.

11.3 Gestion et traitement des données : plateformes et clouds

Les données des capteurs en réseaux parviennent soit sur un site internet, développé sur mesure, via des passerelles (box, modem) connectées à des serveurs fournis par des opérateurs de type OVH soit sur des serveurs locaux (sur un ordinateur ou un réseau ethernet) soit sur un cloud, géré à l'aide de plateformes, solutions qui prolifèrent depuis 2016, fournies par des sociétés de toute taille (IBM, GOOGLE, AMAZON, ORANGE, SFR Arduino)

Suivant la complexité du réseau et le nombre de nœuds (node) connectés (sur lesquels sont connectés un ou plusieurs capteurs), un module logiciel interface (device management ou connectivity management) sera proposé par les intégrateurs.

Une plateforme de device management est particulièrement conseillée lors de l'utilisation de réseaux avec abonnement et cartes SIM (Orange SFR Objenious etc.). Les opérateurs GSM (Orange Bouygues/Objenious SFR

Certaines plateformes permettent de générer des drivers de modules si le fabricant ne les a pas prévus (API)

EDGE computing (programmation en bordure) : plutôt que de faire arriver des centaines de données sur un cloud, certaines passerelles peuvent effectuer un pré traitement et envoyer les informations « digérés », ce qui permet de diminuer la puissance de calcul au niveau du serveur/cloud final. Ces dispositifs sont d'importance dans la smart industrie 4.0 où le flux de données peut vite devenir ingérable par les systèmes informatiques et les saturer (s'il y a de la vidéo par exemple). La gestion de capteurs environnementaux ne requiert pas cette stratégie de pré traitement.

La tarification des plateformes est de 3 types :

- Paiement d'une licence avec éventuellement des frais de personnalisation
- Paiement à l'utilisation : au nombre de Moctets traités
- Paiement au nombre de connexion en place (1 connexion = 1 passerelle LORA par exemple)

Tableau 188 exemples de plateformes IOT

Nom de la plateforme	propriétaire	fonctionnalités	Cout par octet
AZURE	Microsoft	Généraliste	
AWS	Amazon	généraliste	
Google IOT core	Google	généraliste	0 € jusqu'à 250 Mo/mois
Liveobjects	Orange	Dédiée IOT	5 à 25 € /mois
valovision	SUEZ	Supervision des déchets (réseau réservé aux clients)	
CISCO kinetic for cities	CISCO		
Kheiron	IOTHINK	Dédiée IOT	10 à 16 € / capteurs /an
opennebula		Cloud hyperviseur	
octave	Sierra Wireless	Spécifique matériel Sierra wireless	1\$/1000 messages
Cloudgate	Option		Devis sur mesure
IRIIS	WIIO	Généraliste, permet de récupérer les données de sources différentes	147 €/mois par type de passerelle
RTOWER	RTONE		20 k€ + personnalisation (50 à 300 k€)
IOT Factory Software Platform	IOT Factory	Généraliste, permet de récupérer les données de sources différentes	140€/ mois pour 50 capteurs connectés
CommonSense IOT	Vertical M2M	Généraliste, permet de récupérer les données de sources différentes	En attente d'informations
resIOT platform	resIOT	réseau LORA exclusivement	Tarifcation compliquée
thingworx	PTC	IOT industriel	
ORISUN-IOT	ORISUN	Généraliste, permet de récupérer les données de sources différentes	50€/mois pour 100 capteurs 8500 euros pack mise en service
ALASKA	IOTEROP	Device management plateforme	
ATOS codex IOT services	ATOS	Plateforme complète	
PCVUE	Arc informatique	Supervision (GTC/GTB ou usines)	Licences de 1200 € à 10 000 €
CHIRPSTACK	sans	Plateforme collaborative LORAWAN	

Quelques plateformes bâties sur des open sources (logiciels de programmation ouverts à tous) sont disponibles pour les développeurs

- KAA IOT, THINGER, SITEWHERE, THINGSBOARD, NODE-RED (pour utilisation avec cartes raspberry, arduino, beaglebone) et cloud AWS, Google etc., OPENREMOTE (bâtiments et villes intelligentes), ZETTA

Pour simplifier les opérations, certains acteurs de l'IOT proposent des logiciels interfaces (connectivity management) entre les données issues des capteurs et les plateformes généralistes (AWS Google AZURE etc.)

- Exemple avec le logiciel **ThingPark Enterprise** qui permet de se connecter avec des passerelles de Kerlink, Cisco, Multitech etc.

Activity – ThingPark Enterprise
Private LoRaWAN Connectivity Management Solution

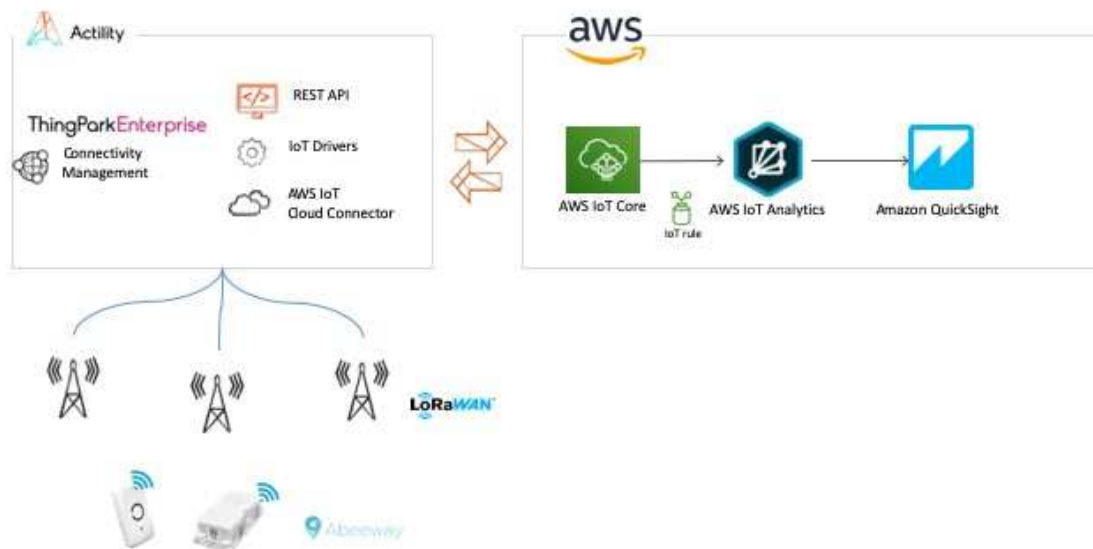


Figure 29 architecture d'un réseau utilisant le logiciel ThingPark Enterprise (device management)

PCVUE de ARC Informatique : architecture « simple »

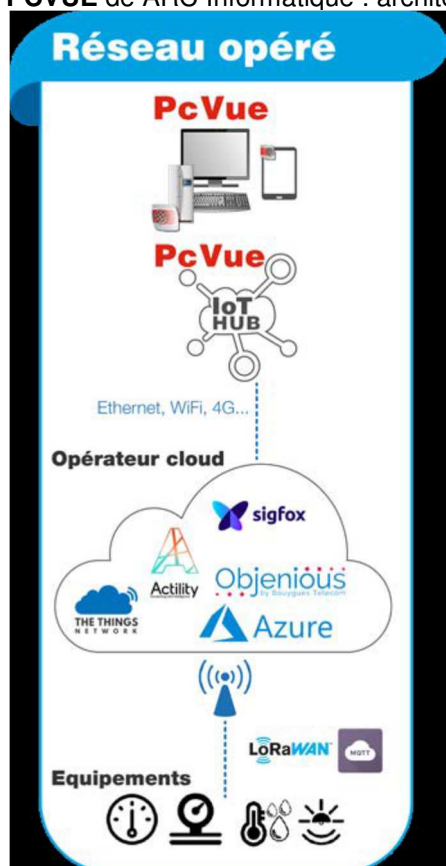


Figure 30 architecture plateforme PCVUE

11.3.1.1 Solutions de stockage

Le stockage de données numériques s'effectue dans divers supports matériels mémoires :

- mémoires mobiles (clé USB, cartes SD ou microSD, qui atteignent maintenant 512 Gigaoctets disques durs externes),
- disques durs d'ordinateurs de bureau, serveurs dédiés,
- cloud (serveurs internationaux alloués en temps réels)

11.3.1.2 Les acteurs du cloud

Les fournisseurs de plateformes gèrent les données dans des serveurs non localisés (cloud)

- Amazon (AWS)
- Microsoft (AZURE)
- Google (Google cloud)
- IBM : IBM
- les opérateurs satellitaires

Dans le cas de serveurs gérés en interne on utilise des fournisseurs d'accès internet qui proposent des services cloud publics ou privés

- acteurs français exemples :
 - ovh
 - Nfrance

11.3.1.3 « BIG DATA » : Logiciels de traitement des données

Le « big data », appellation du traitement de nombreuses données, nécessite des logiciels de plus en plus sophistiqués souvent indissociables de la notion d'intelligence artificielle (IA)

Les Logiciels utilisés sont développés en interne ou sous traités à une SSII, ils utilisent de plus en plus des plateformes (framework) développées par des multinationales ou des experts individuels (open source comme linux) bénévoles.

Il existe plusieurs de ces logiciels open source aptes à traiter de grandes quantités de données

Les développeurs utilisent des logiciels tels que : Hadoop , Storm, Cassandra, Mahout,spark, mongoDB dont certains proviennent d'APACHE, acteur majeur de l'open source

11.3.1.3.1 Le développement logiciel : sous-traitance

La liste des sociétés d'ingénierie en informatique est longue, nous ne citons que les plus connues, ces sociétés peuvent répondre à un cahier des charges spécifiques IOT, à un tarif journalier consultant ou forfaitaire par projet.

La partie informatique de l'IOT peut être sous traitée à ces sociétés.

- Cap gemini (travaille sur une plateforme de communication industrielle universelle)
- Sopra steria (IoT sur mesure)
- Altran technologies (racheté par Cap Gemini) (56 693 salariés C-A 3.2 milliard)
- AKKA (21 000 salariés, C-A 1.8 milliard)
- Alten (37 200 salariés C-A 2.6 milliard)
- Expleo (15 000 salariés, C-A1.1 milliard)
- Accenture (compétences en cloud) (492 000 salariés C-A : 34 milliards)

11.4 Rappels sur les ondes électromagnétiques

Un rappel des quelques notions fondamentales de l'électromagnétisme permettra de mieux comprendre les enjeux technologiques des réseaux (portée, puissance, sécurisation)

11.4.1 Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ,

C'est une transmission dans l'espace d'énergie sous forme de champ magnétique et électrique oscillants à la même fréquence, et perpendiculairement.

Selon la dualité onde corpuscule, modèle mathématique établi par Louis de Broglie en 1924, pour expliquer les rayonnements électromagnétiques, une onde est constituée de corpuscules appelés photons, sans masse (ce qui explique que les antennes peuvent être des portions des cuivre zigzagantes sur les circuits imprimés).

(nota bene : ceci est le résultat de la mécanique quantique qui n'est qu'un modèle mathématique tentant d'expliquer le monde physique à l'échelle nanoscopique).

L'énergie transportée par une onde est égale (relation de Planck Einstein) à :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

E est l'énergie du photon (en joules) ; c'est le quantum d'énergie (niveau d'énergie discontinue de la mécanique quantique)

h est la constante de Planck dont une valeur approchée est $h \approx 6.62 \times 10^{-34}$ J.s (joule.seconde)

λ la longueur d'onde (en mètre)

c la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s)

ν (ou f) est la fréquence (en hertz) de l'onde électromagnétique associée au photon considéré :

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

la période ou le temps de cycle d'une onde est l'inverse de la fréquence : $T = \frac{1}{f}$ (en seconde)

Les liens qui régissent le rapport entre champ électrique \vec{E} , et le champ magnétique \vec{B} (ou \vec{H} excitation magnétique) d'une onde sont donnés par les 4 équations de Maxwell :

$$\text{rot } \vec{E} = - \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \text{ (Equation de Maxwell-Faraday)}$$

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \text{ (Equation de Maxwell-Gauss)}$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \text{ (Equation de Maxwell-Thompson)}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \sigma \vec{E} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \text{ (Equation de Maxwell-Ampère)}$$

Ou :

ρ : densité volumique de charge électrique

ϵ : permittivité électrique (F/m). $\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r$, ϵ_0 : permittivité diélectrique dans le vide (= 8.85×10^{-12}) et ϵ_r : permittivité électrique relative

μ : perméabilité magnétique (H/m) $\mu = \mu_0 \times \mu_r$ μ_0 : permittivité diélectrique dans le vide (= $4\pi \cdot 10^{-7}$) et

μ_r : permittivité magnétique relative

σ : conductivité électrique du milieu (S/m)

11.4.1.1.1 Champ électrostatique et champ magnétique

Un champ magnétique statique crée des lignes de champ magnétique stable dans le temps qui ne se propage pas au-delà de quelques centimètres (sauf le champ magnétique terrestre).

Un champ électrique statique s'appelle un champ électrostatique. Il est constitué par la présence de charges électriques de signe différent (électrons, protons, cations, anions). Il ne se propage pas dans l'espace.

Ce sont **2 énergies potentielles qui ne travaillent pas** sauf à les déplacer (pour constituer par exemple des moteurs électriques).

11.4.1.2 Les gammes de longueurs d'onde

Nom	<u>Longueur d'onde (m)</u>	<u>Fréquence (Hz)</u>	Énergie du <u>photon (eV)</u>
Rayon gamma	< 10 <u>pm</u>	> 30 <u>EHz</u>	> 124 <u>keV</u>
Rayon X	10 pm – 10 <u>nm</u>	30 EHz – 30 <u>PHz</u>	124 keV – 124 eV
Ultraviolet	10 nm – 390 nm	30 PHz – 750 <u>THz</u>	124 eV – 3,2 eV
Visible	390 nm – 750 nm (0.39 μ m-0.75 μ m)	770 THz – 400 THz	3,2 eV – 1,7 eV
Infrarouge	750 nm – 0,1 mm (0.75 μ m- 100 μ m)	400 THz – 3 THz	1,7 eV – 12,4 meV
TéraHertz submillimétrique /	0,1 mm - 1 mm	3 THz - 300 GHz	12,4 meV - 1,24 meV
Micro-ondes	1 mm - 1 m	300 <u>GHz</u> - 300 <u>MHz</u>	1,24 meV - 1,24 μ eV
Ondes radio	1 m – 100 000 km	300 MHz – 3 Hz	1,24 μ eV – 12,4 <u>feV</u>

11.4.1.3 Gammes de longueurs d'ondes « radio »

Unités : KHz (kilo hertz) MHz (mega hertz) GHz (gigahertz)

Désignation internationale	Désignation francophone	Fréquence	Longueur d'onde	Autres appellations	Exemples d'utilisation
ELF (<i>extremely low frequency</i>)	EBF (extrêmement basse fréquence)	3 Hz à 30 Hz	100 000 km à 10 000 km		Détection de phénomènes naturels
SLF (<i>super low frequency</i>)	SBF (super basse fréquence)	30 Hz à 300 Hz	10 000 km à 1 000 km		Communication avec les sous-marins
ULF (<i>ultra low frequency</i>)	UBF (ultra basse fréquence)	300 Hz à 3 000 Hz	1 000 km à 100 km		Détection de phénomènes naturels
VLF (<i>very low frequency</i>)	TBF (très basse fréquence)	3 kHz à 30 kHz	100 km à 10 km		Communication avec les sous-marins, (20 mètres de profondeur) Implants médicaux, Recherches scientifiques...
LF (<i>low frequency</i>)	BF (basse fréquence)	30 kHz à 300 kHz	10 km à 1 km	grandes ondes	Radioamateur, Radionavigation, Radiodiffusion Grandes Ondes, Radio-identification
MF (<i>medium</i>)	MF (moyenne)	300 kHz à	1 km à 100 m	petites ondes ou ondes moyennes	Radioamateur, Radiodiffusion PO, Service maritime, Appareil de recherche de victimes d'avalanche (457 kHz portée d'environ 80m dans

<i>frequency)</i>	fréquence)	3 MHz		ou hectométriques	la neige)
HF (<i>high frequency</i>)	HF (haute fréquence)	3 MHz à 30 MHz	100 m à 10 m	ondes courtes ou décamétriques	Organisations diverses, Militaire, Radiodiffusion OC, Maritime, Aéronautique, Radioamateur, Météo, Radio de catastrophe, etc.
VHF (<i>very high frequency</i>)	THF (très haute fréquence)	30 MHz à 300 MHz	10 m à 1 m	ondes courtes ultra-métriques	Radiodiffusion FM, Radiodiffusion RNT, Aéronautique, Maritime, Radioamateur, Gendarmerie, Pompiers, SAMU, Réseaux privés, taxis, militaire, Météo, etc. Réseau wize (SUEZ GRDF etc)(169 Mhz)
UHF (<i>ultra high frequency</i>)	UHF (ultra haute fréquence)	300 MHz à 3 GHz	1 m à 10 cm	ondes décimétriques	Réseaux privés, militaire, , GPS, téléphones sans fil (DECT), WIFI,bluetooth Télévision, Radioamateur, four micro onde etc. Réseaux GSM (GPRS,EDGE ,2G,3G,4G) Réseaux LTE-M, NB-IoT Réseau LPWAN 868 MHz (LORA SIGFOX)
SHF (<i>super high frequency</i>)	SHF (super haute fréquence)	3 GHz à 30 GHz	10 cm à 1 cm	ondes centimétriques	Réseaux privés, WIFI , Radiodiffusion par satellite (TV), Faisceau hertzien, Radar météorologique, Radioamateur, etc. Future 5G à 26 GHz

EHF (<i>extremely high frequency</i>)	EHF (extrêmement haute fréquence)	30 GHz à 300 GHz	1 cm à 1 mm	ondes millimétriques	Réseaux privés, Radars anticollision pour automobiles, Liaisons vidéo transportables, Faisceau hertzien, Radioamateur, etc.
Térahertz	Térahertz	300 GHz à 3 000 GHz	1 mm à 100 µm	ondes submillimétriques	scanner corporel (detection dans les aeroports)

11.4.1.4 Génération d'une onde électromagnétique

Un photon (une onde) est généré chaque fois qu'un électron d'une couche électronique d'un atome est excité (apport d'énergie sous diverses formes, thermique, électrique, électromagnétique, chimique, mécanique) et qu'il retombe sur une couche d'énergie moindre.

La différence d'énergie E entre les 2 couches électroniques correspond à l'énergie du photon, qui détermine sa longueur d'onde associée

d'après la relation de Planck Einstein $\lambda = h.c/E$ (c vitesse de la lumière)

Les réactions nucléaires (la radioactivité), impliquant les particules du noyau atomique (protons, neutrons) s'accompagnent elles aussi d'émissions de rayonnement électromagnétique de type gamma, très énergétiques.

Dans la nature, seuls existe des faisceaux d'ondes électromagnétiques (ou rayonnement électromagnétique) puisqu'une onde électromagnétique n'est jamais émise seule (L'observation d'un photon seul a donné lieu au prix nobel décerné à Serge Haroche en 2012)

le rayonnement électromagnétique :

Nous avons vu que chaque photon transporte une énergie $E = h.c/\lambda$

Un rayonnement électromagnétique est une somme de photons qui se propagent à la vitesse de la lumière (ou presque, dans la matière). Les photons ne sont en général pas tous à la même longueur d'onde : on appelle « spectre d'émission » la décomposition d'un rayonnement en ces diverses longueurs d'onde.

Les lasers (light amplification by stimulated emission of radiation) sont les seuls dispositifs émettant spontanément un rayonnement dit monochromatique (une longueur d'onde unique) mais qui ne l'est pas réellement : l'émission spontanée des lasers a une largeur de bande qui peut varier du millièmeter à quelques centaines de nanomètres. C'est la cavité de résonance du laser (un interféromètre de Fabry Perot qui consiste en 2 miroirs d'un coefficient de réflexion proche de 100% qui se font face) qui peut permettre de minimiser la largeur de bande (qui peut atteindre 1 Hertz).

Un rayonnement électromagnétique se propage jusqu'à ce que tous ces photons soient convertis en une autre forme d'énergie : rayonnement à une autre longueur d'onde (fluorescence), courant électrique par effet photoélectrique (solaire photovoltaïque), chaleur par agitation moléculaire (solaire thermique), courant électrique dans une antenne de réception

Flux d'émission

Le rayonnement n'est pas uniforme dans l'espace. La source d'émission en est la première responsable et l'espace de propagation du rayonnement en est le deuxième.

Dans le cas des ondes radioélectriques (du KHz au GHz) le design des antennes est primordial pour définir la forme du rayonnement et sa dispersion future.

On parle de cône ou diagramme d'émission d'une antenne.

Exemple de cône d'émission :

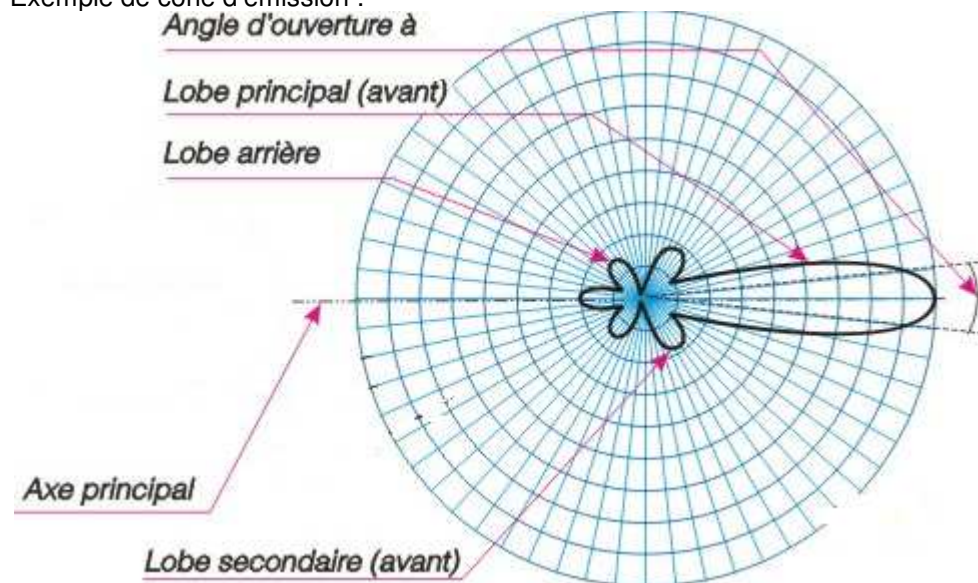


Figure 31 exemple de cône d'émission d'une antenne

Cohérence spatiale et temporelle :

Cette notion concerne principalement les lasers dont nous parlerons ultérieurement comme véhicule de l'information.

Un faisceau d'ondes électromagnétiques est constituée d'une multitude de photons qui peuvent être émis en même temps (cohérence temporelle) dans une même direction depuis un même point (cohérence spatiale)

l'effet laser permet d'obtenir des ondes cohérentes temporellement et spatialement.

Le niveau de cohérence des ondes, c'est-à-dire les liens spatio-temporels entre les photons, détermine la qualité de la réception qui dépendra aussi du profil de l'antenne de réception.

La diffraction d'un faisceau « cohérent » pourra donner des informations sur les dimensions et la structure de la matière : cristallographie aux rayons X, image de Steckel laser d'une surface, figure de diffraction d'un laser par des fentes etc.

directionnalité d'une onde :

On peut rendre plus ou moins directionnelle une onde en jouant sur le design mécanique et les matériaux des antennes d'émissions.

Plus la longueur d'onde est petite plus le faisceau d'onde peut être directionnel, grâce à la facilité de réaliser des antennes directionnelles car plus la longueur d'onde est petite plus l'antenne est petite (les antennes ont une longueur de l'ordre de la moitié ou du quart de la longueur d'onde)

11.4.1.5 Réception d'une onde électromagnétique

Les ondes électromagnétiques sont captées grâce à des antennes qui transforment l'énergie des photons en mouvement d'électrons (courant électrique).

Ou, de manière très anecdotique, en mouvement moléculaire qui produit de la chaleur qui est ensuite transformé en tension électrique par effet pyroélectrique (ex : camera thermique bolométrique)

11.4.1.6 Antennes d'émission ou réception

Les antennes sont les dispositifs qui permettent de transformer les signaux électriques (tension ou courant) dans un conducteur en ondes électromagnétiques (champ E et B) dans l'espace environnant. Elles sont caractérisées par leur gain et leur directionnalité (lobe d'émission ou de réception, diagramme de rayonnement)

Les dimensions d'une antenne simple, omnidirectionnelle, sont de l'ordre de la longueur d'onde, on parle souvent d'antenne Quart d'onde ou demi onde.

Exemple : pour les dispositifs 868 Mhz (réseaux sigfox, lora) la longueur optimale d'une antenne coaxiale est de 68 mm proche du quart d'onde (la longueur d'onde est de 345 mm)

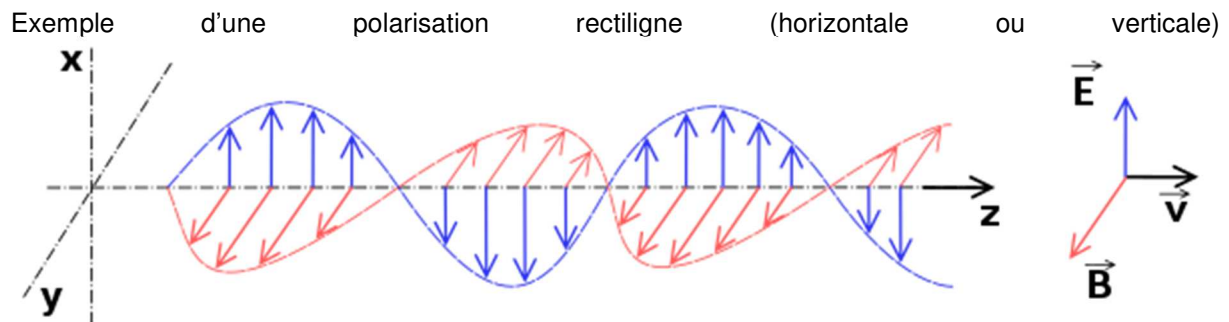
L'antenne la plus simple, et la moins chère, est un morceau de câble coaxial¹ dénudé sur une longueur de l'ordre du quart d'onde (dénudé signifie qu'on a enlevé la gaine conductrice extérieure).

Le plus couteux est la protection plastique protégeant et rigidifiant le câble. (antennes fouet sortant des premiers téléphones portables)

Polarisation des ondes

Les vecteurs champs électriques et magnétiques peuvent se déplacer de manière plane (suivant 2 plans perpendiculaires dans l'espace), circulaire ou elliptique en fonction de la tension qui les génèrent.

L'optimisation de la réception d'une onde devra tenir compte de la polarisation (par exemple l'antenne de réception sera parallèle à l'antenne d'émission dans le cas d'une onde « plane »)



Faisceaux hertzien : Appellation utilisée pour qualifier des transmissions entre 2 sites munis d'antennes directionnelles (la distance entre les 2 peut atteindre 100 km)

¹ Câble constitué d'un fil conducteur central et d'une tresse de masse l'entourant isolé par une gaine plastique

Différents types d'antennes

- **Antenne râteau :**



Antenne de réception de télévision (bande UHF 470 à 790 MHz)

Antennes satellites paraboliques : la parabole sert à concentrer les ondes vers un récepteur, beaucoup plus petit situé au point de concentration de la parabole, ces antennes permettent d'augmenter la faible puissance du signal reçu des satellites

- **antenne fouet** : constituée d'un câble coaxial dénudé sur une longueur quart d'onde et protégé par un fourreau en plastique souple

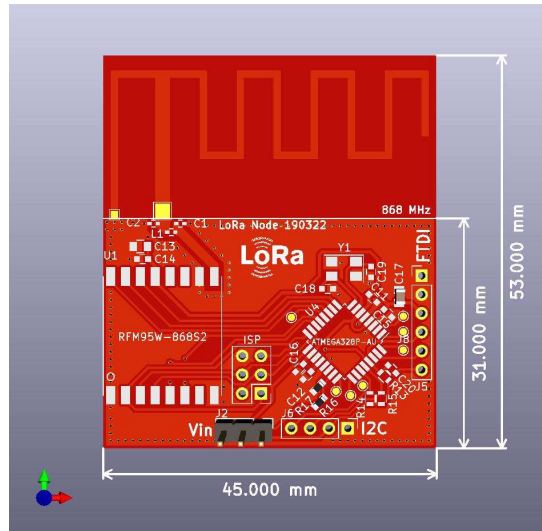


- **antenne céramique** : de dimension millimétrique et destinée à être montée sur circuit imprimé (antenne 3D qui peut être réalisée sur imprimante 3D)



dimensions 7 mm x 2 mm x 1.2 mm

- **Antenne sur circuit imprimé** : des pistes de cuivres sont réalisées avec un design replié pour diminuer l'encombrement



Puissance d'émission/gain/décibels

la puissance d'un émetteur est donnée en Watt.

Le gain d'une antenne est le rapport entre la puissance du signal entrant dans l'antenne P_{in} (correspondant à la puissance de l'émetteur) et la puissance restituée par l'antenne P_{out} (donc la puissance dite de sortie)

Ce rapport s'exprime en décibels (dB)

$$\text{Gain (en décibel)} = 10 \times \text{LOG} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

Tableau de correspondance :

Rapport simple Pout/pin	1	2	10	100	1000
Gain (dB)	0	3	10	20	30

Gain

Dans le secteur des réseaux sans fil, les valeurs de l'output et de l'input power sont exprimés en milliwatts (mW).

11.4.1.6.1 caractéristiques principales des antennes :

- les fréquences d'utilisation ;

la réception d'une antenne est optimum autour de sa fréquence de résonance, qui dépend de ses dimensions, la bande passante d'une antenne est de l'ordre de 1% de cette fréquence

- le diagramme de rayonnement ;
- l'impédance d'antenne : comme tout composant électrique une antenne est caractérisée par sa valeur d'impédance (résistance + capacitance + inductance) : c'est un paramètre important pour garantir un bon rendement d'émission : il faut « adapter » les impédances de l'antenne au circuit amont.
- la polarisation (plane elliptique circulaire)
- le rendement (gain) : rapport entre la puissance fournie en entrée de l'antenne et sa restitution sous forme d'onde (exprimé en dB décibels)
- la puissance maximale tolérée en émission ;
- l'encombrement mécanique : suivant sa taille, l'antenne pourra réceptionner plus ou moins de signal : les systèmes d'antennes parabolique, du fait de leur aptitude à concentrer contribuent à de forts rendements et seront privilégiés pour les réceptions satellitaires

11.4.2 Propagation des ondes électromagnétiques

dans le vide

les ondes électromagnétiques se propagent en ligne droite à la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s)

dans la matière

indice de réfraction (optique) :

Dans le cas des ondes électromagnétiques du domaine de l'optique (UV à l'infrarouge) on utilise principalement l'indice de réfraction pour caractériser la transmission dans des matériaux transparents.

La notion de permittivité, ϵ , sera à utiliser pour des matériaux non transparents $n = \sqrt{\epsilon}$

$V_m = C/n$

- V_m = la vitesse de propagation dans la matière
- C vitesse de la lumière dans le vide
- n = indice de réfraction du milieu traversé (cet **indice varie avec la longueur d'onde**)

quelques valeurs de n :

Milieu	n (indice de réfraction)
eau	1.333
air	1.000293
éthanol	1.36
Glace	1.309
PMMA (plexiglas)	1.49
Verre	1.5 à 1.7
diamant	2.417

Lorsqu'une onde change de milieu d'indice différent elle change de direction. C'est pour cette raison que les grandes ondes peuvent faire le tour de la terre en étant déviées par les couches atmosphériques dont l'indice varie continuellement en fonction de la hauteur et de l'ionosphère couche de plasma (entre 80 et 800 km d'altitude)

permittivité /perméabilité :

La permittivité, notée ϵ , décrit la réponse de la matière à un champ électrique (la perméabilité, μ , est la réponse de la matière à un champ magnétique (pour les matériaux magnétiques)

$E = \epsilon_0 \epsilon_r$ (ϵ_0 permittivité du vide et ϵ_r permittivité relative)

La molécule d'eau par exemple, molécule fortement polaire (les charges électriques ne sont pas réparties également dans l'espace et forment un dipôle électrique + et -) va s'aligner selon le vecteur champ électrique. Le champ électrique macroscopique va donc être fortement augmenté, d'où une permittivité beaucoup plus élevée que les autres matériaux.

La permittivité de l'eau varie beaucoup avec la fréquence, c'est pour cela que l'indice de réfraction aux longueurs d'ondes de l'optique ne présente pas une valeur singulière comme c'est le cas pour la permittivité à basse fréquence (<100 GHz)

La permittivité dépend de nombreux facteurs (température, fréquence, humidité etc.)

Quelques valeurs :

Milieu	ϵ_r permittivité relative
Vide	1
Air sec	1.0006
Eau	78 (mais 10 si $f > 100\text{GHz}$)
Papier	2.3
Plexiglas	3.5
quartz	4.5
Verre	5
Mica	8

Réflexion, réfraction, transmission, absorption, diffusion, diffraction :

Les photons voyagent en ligne droite dans le vide

Lorsqu'une onde seule (un photon) rencontre la matière elle est soit

- réfléchi (effet miroir),
- transmise (transparence du milieu)
- réfracté lors d'un changement de milieu (c'est-à-dire dévié selon un angle qui dépend de la différence d'indice de réfraction des 2 milieux traversés) soit
- absorbée.

Quand on a affaire à un faisceau d'ondes 2 autres phénomènes interviennent : la diffusion ou la diffraction des ondes qui rend compte du phénomène d'interférence entre les différentes ondes constituant le faisceau et les interactions avec la matière

- Diffraction : si nous avons des interférences constructives et destructives le faisceau d'onde d'entrée se divise en étant réémis dans certaines directions privilégiées (cas de la diffraction aux rayons X qui permet de déterminer le type de structures cristallines de la matière)

Diffusion : s'il n'y a pas d'interférences la matière peut simplement décomposer le faisceau d'onde et le réémettre dans toutes les directions de manière plus ou moins homogène
Tous ces phénomènes sont fonction des atomes rencontrés de leur agencement et de la longueur d'onde des photons et leur condition d'entrée dans la matière (faisceaux dispersés, cohérents, polychromatiques etc.)

•
Effet de peau :

Lorsqu'une onde électromagnétique pénètre un métal conducteur un champ magnétique créé par l'agitation des électrons s'oppose à la pénétration de l'onde dans le métal, et ceci d'autant plus que le métal est conducteur

valeur de la profondeur de peau (e) pour le cuivre et l'eau de mer :

Fréquence	cuivre	Eau de mer
50 Hz	9,38 mm	
10 kHz	0,66 mm	5 m
100 kHz	0,21 mm	
1 MHz	66 µm	0.25 m
1 GHz	2,1 µm	0.023 m
1 THz	66 nm	

Les ondes électromagnétiques ne traversent donc pas les conducteurs : il y aura absorption (chaleur comme dans le cas du chauffage par induction) et réflexion (d'où les antennes paraboliques qui renvoient les ondes)

En pratique on considère qu'une onde est complètement atténuée lorsque la profondeur de pénétration est égal à 7 fois l'épaisseur de peau.

Cas de l'eau de mer, conductrice du fait de la présence de sels minéraux : Les transmissions électromagnétiques sont arrêtées quasiment en surface (8m de profondeur pour un signal à 1kHz)

L'humidité de l'air a une forte influence sur la transmission des ondes électromagnétiques, on peut le constater personnellement : le GPS qui acquiert plus ou moins vite les signaux des satellites en fonction de la météo.

Blindage électromagnétique (cage de faraday)/mumetal:

Les ondes électromagnétiques (les champs électriques de manière générale) ne peuvent pas pénétrer une boîte (cage) constituée de matière conductrice (en général un métal) : La démonstration est basée sur le fait que si une charge électrique se trouve à l'intérieur de la cage elle crée un champ électrique entre 2 points du conducteur, ce qui est impossible étant donné la nature même d'un conducteur (idéal qui n'a pas de résistance).

On utilise donc des câbles coaxiaux blindés (c'est-à-dire muni d'une treille métallique entourant une âme de cuivre) pour véhiculer les courants électriques jusqu'aux antennes (émettrices ou réceptrices). Une grille métallique suffit lorsque la maille de la grille est petite par rapport à la longueur d'onde : (exemple du four à micro-ondes qui ne nous inonde pas de micro-ondes grâce à la grille métallique sur la vitre de maille de quelques millimètres pour une longueur d'onde de 12.5 cm).

Certains matériaux, appelés **mumétal**, alliages de Nickel fer cuivre chrome réalisés par trempe (réchauffement) ultra rapide, ont de très fortes perméabilités, ($\mu > 100\ 000$) sont utilisés pour des blindages électromagnétiques très efficaces.

- Ils déforment aussi les ondes électromagnétiques (dans la gamme des Mhz dans les portiques des magasins lorsqu'un produit, porteur d'une bandelette de mumetal (2x10x0.1 mm) passe les portiques détecteurs des magasins)

Interférences / bruits :

Deux problèmes majeurs coexistent dans le traitement des signaux (électriques ou autres : le bruit et les interférences.

Le bruit peut être de nature et d'origine très diverses (2 personnes se parlant avec un marteau piqueur à proximité).

Les interférences sont des signaux de nature similaire mais provenant de sources différentes (une foule d'individus parlant 2 à 2 seront gênés par les conversations environnantes)

Une notion fondamentale en électronique est **le rapport signal sur bruit** (SNR, signal to noise ration en anglais). C'est une caractéristique qui est déterminée pour qualifier la qualité des circuits électroniques et savoir si on va pouvoir détecter un signal dans du bruit.

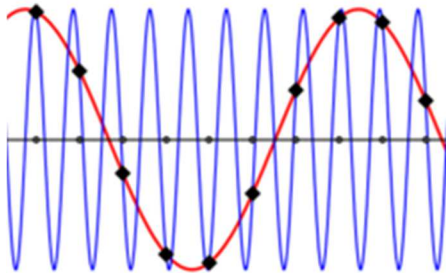
Se mesure en dB ($10 \times \text{LOG}(\text{signal}/\text{bruit})$)

Le théorème de shannon (nyquist) ou comment le numérique a pu supplanter l'analogique

Nous avons pris l'habitude de transformer tout signal analogique en signal numérique. Et ceci presque sans perte de qualité, même après transmission des signaux à des milliers de kilomètre.

Pour cela on échantillonne le signal analogique, c'est-à-dire qu'on le découpe en morceau et la valeur (en tension par exemple) de chaque morceau est converti en octet (suite de 0 et de 1)

A la réception on fait l'inverse : les octets sont reconvertis en tension analogique pour être envoyés sur les hauts parleurs (dans le cas de la voix)



Claude Shannon, en 1949, a déterminé que pour reconstituer fidèlement un signal de fréquence F il fallait échantillonner à une fréquence 10 fois supérieure

Par exemple, pour transmettre fidèlement la voix dont le spectre s'étale jusqu'à 16 kHz, il faudrait une fréquence d'échantillonnage de 160 kHz (dans les CD de musique on se contente d'une fréquence d'échantillonnage de 44.1k Hz)

effet doppler (impact sur les émetteurs ou récepteurs mobiles)

L'effet doppler rend compte de la variation de la fréquence d'une onde émise par une source (ou d'un objet sur laquelle elle se réfléchit) en mouvement et d'un perceuteur fixe, ou de manière équivalente d'une onde émise par une source fixe et un récepteur mobile

La variation de longueur d'onde λ (ou de fréquence f) est égale à $\Delta\lambda = \frac{v}{c} \lambda$ (ou $\Delta f = \frac{v}{c} f$)

ou v est la vitesse de déplacement du récepteur ou de l'émetteur, c la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s)

Exemple : pour une émission à 868 MHz, une vitesse v de 300 km/h (TGV) le décalage en fréquence est de 241 Hz. Donc supérieur aux 100 Hz de la largeur de bande des signaux sigfox

Lorsque le mode d'émission est constitué d'une onde électromagnétique de bande très étroite (réseau sigfox par exemple) il existe une vitesse limite au-delà de laquelle la transmission sera interrompue ou perturbée

Les satellites sur orbites basses, voyageant à une vitesse d'environ 7.7km/s sont obligés de tenir compte de ce décalage en fréquence (constant dans le temps et prédictif).

Transmissions de données grâce aux ondes électromagnétiques : modulation

Les ondes électromagnétiques sont des vecteurs de transmission de données la forme de l'onde est en générale sinusoïdale.

On peut utiliser différentes fréquences de porteuses pour avoir des canaux de transmissions multiples (les canaux ou channel en anglais)

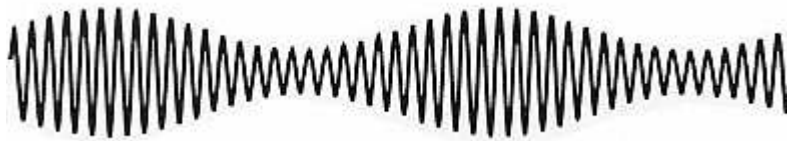
On découpe la fonction transmission en

1) Onde porteuse : celle qui sert de véhicule, elle est de forme sinusoïdale et de fréquence très supérieure à la fréquence de modulation

2) une onde de Modulation : on modifie l'onde porteuse pour y insérer des données

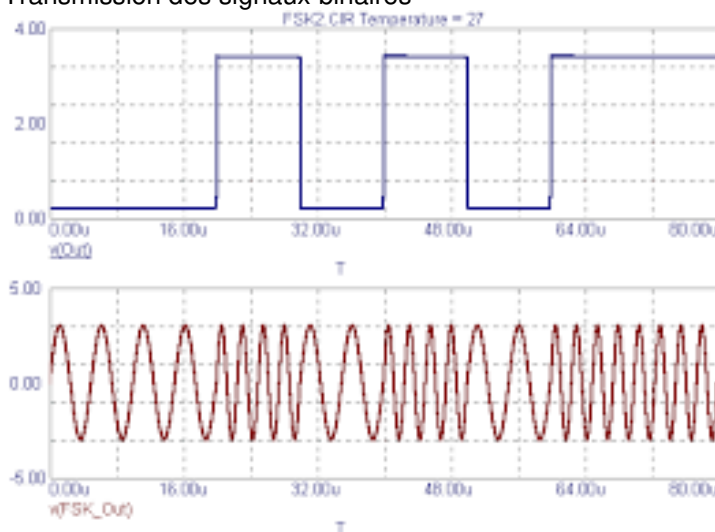
Exemples de modulation simples :

- Modulation d'amplitude : on fait varier l'intensité de la porteuse



- Modulation en fréquence :

Transmission des signaux binaires



Dans les GSM ou d'autres réseaux on utilise la modulation par déplacement de fréquence (frequency shift keying , FSK en anglais) et ses dérivées GMFSK ou GFSK

LORA utilise une modulation à étalement de spectre css (chip spread spectrum)

D'autres types modulation existent

11.4.3 Normes, réglementations et groupes de travail des radiocommunications

Il existe des réglementations qui définissent les règles d'utilisation des ondes électromagnétiques.

Elles définissent en particulier l'attribution des bandes de fréquence en fonction de leur utilisation.

Ces réglementations sont conçues par des instances internationales (UIT) européennes (ETSI) et déclinées au niveau national (ANFR).

Les réglementations font parfois références à des normes construites par différentes instances (ISO, IEC etc.)

Les normes dans les télécommunications encadrent essentiellement les protocoles de communication et les puissances d'émission

11.4.3.1 Au niveau international

Une autorité internationale, l' [UIT](#), union internationale des télécommunications, règle l'allocation des bandes de fréquence par zone. Plus de 800 membres

Le monde est divisé en 3 régions, la France, du fait de ses départements et territoires d'outre-mer, est présente dans les 3 régions.

Plusieurs groupes de travail à l'UIT dont le [FG-SSC](#) « villes intelligentes » qui a achevé ses travaux en mai 2015, avec l'approbation de 21 **spécifications et rapports techniques**.

11.4.3.2 Niveau européen

L'ETSI (European Telecommunications Standards Institute (, c'est-à-dire l'Institut européen des normes de télécommunications, est l'organisme de normalisation européen du domaine des télécommunications

48 pays ont adopté la norme ETSI . Une application nationale est déclinée via **le CEPT (conférence européenne des postes et télécommunications)**

Le RSPG (groupe européen sur la politique du spectre) : assiste la commission sur la politique d'allocation des fréquences

Avis du RSPG sur l'internet des objets :

11.4.3.3 Niveau français

ANFR/ARCEP :

2 instances gèrent les télécommunications en France.

L'**ANFR** (l'agence nationale des fréquences) : établissement public de l'État qui gère les sites et les assignations des opérateurs mobiles, elle en contrôle les installations et les émissions et traite les brouillages. Elle gère les plans de fréquence et les demandes d'autorisation.

Le tableau national des bandes de radio fréquence en fonction de leur utilisation et leur puissance admissible : [TNBRF](#) (286 pages)

Les normes des télécoms évoluent constamment et rapidement pour tenir compte des avancées technologiques. Un exemple d'avis de l'ANFR sur le dossier IoT

<https://www.anfr.fr/international/negociations/grands-dossiers-dactualite/iot-m2m/> en particulier

L'**ARCEP** (Autorité de régulation des communications électroniques et des Postes) : autorité administrative indépendante (une fusion avec le CSA est envisagée)

Elle veille notamment à la bonne utilisation des fréquences mobiles, à leur couverture de la population, à la subsistance de la concurrence, etc.

11.4.3.4 Impact sur la santé des ondes radio

Une partie de la population se sent concernée par la multiplicité des ondes qui nous entourent. C'est un problème récurrent qui doit être pris en compte dans le choix des solutions.

La 5G, par exemple, de part sa puissance d'émission et sa future haute fréquence de 26 GHz commence à inquiéter.

Un décret fixe le niveau des ondes électromagnétiques : [Décret n°2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L. 32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques](#)

11.4.3.5 Organismes de normalisation / normes

Les organismes de normalisation sont constitués par la réunion de sociétés privées et d'organismes publics.

L'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

IEEE (institut des ingénieurs en électricité et électronique) L'organisation a pour but de promouvoir la connaissance dans le domaine de l'ingénierie électrique et électronique. Juridiquement, l'IEEE est une organisation à but non lucratif de droit américain.

L'IEEE a défini plusieurs protocoles de communication utile pour l'IoT,

En particulier pour le domaine des réseaux sans fil :

IEEE 802.15.4.(zigbee, 6LoWPAN etc.) :

Le **802.15.4** est un protocole de communication dit de « bas niveau ». Il est destiné aux réseaux sans fil de la famille des LPWAN (Low power Wide Area Network) du fait de leur faible consommation, de leur faible portée et du faible débit des dispositifs utilisant ce protocole.

802.15.4 est utilisé par de nombreuses implémentations basées sur des protocoles propriétaires (ex : Texas instruments CC1310) ou sur IP (Internet Protocol), comme le Zigbee et le 6LoWPAN.

Les caractéristiques des LWPAN sont :

- la formation d'un réseau de type étoile ou maillé
- l'allocation d'une adresse de 16 bits ou de 64 bits
- l'utilisation de CSMA/CA pour communiquer
- la faible consommation d'énergie
- la détection d'énergie (ED)
- l'indication de la qualité de la liaison (LQI)
- l'utilisation de :
 - 16 canaux dans la bande de fréquence de 2,4 à 2,4835 GHz,
 - 10 canaux dans la bande de fréquence de 902 à 928 MHz,
 - 1 canal dans la bande de fréquence de 868 à 868,6 MHz (**qui permet une puissance d'émission de 500mW pour 25mW dans les autres canaux, mais un seul canal, ce qui n'est pas favorable à un environnement électromagnétique encombré**)

L'**IEEE** a défini deux types de dispositifs pouvant participer à un réseau

- le dispositif ayant toutes les fonctions possibles (FFD : Full Function Device, coordinateur en français)
- le dispositif ayant des fonctions limitées (RFD : Reduced Function Device, le capteur par exemple)

Le *FFD* peut assurer trois rôles dans un réseau : coordinateur PAN, routeur ou dispositif relié à un capteur (plus petite fonction possible, appelé dispositif de fin).

Le *RFD* est prévu pour des applications simples (signaler l'état d'un capteur, contrôler l'activation d'un actionneur). Il est considéré comme un dispositif "d'extrémité" (end device), dans le sens où il n'est pas essentiel au réseau.

Pour communiquer sur un même réseau, un FFD (au moins) et des RFD doivent utiliser le même canal physique parmi ceux définis selon la bande de fréquence choisie. Le FFD peut dialoguer avec des RFD et des FFD, tandis que le RFD dialogue avec un FFD uniquement.

IEEE 802.15.1 : norme définissant le Bluetooth

IEEE 802.11 : norme définissant la WIFI (wireless fidelity)

La dernière version datant de 2014, 802.11ac:

- Fréquence 5GHz, largeur de bande jusqu'à 160 MHz débit jusqu'à 3.5 Gbit/s portée 35 mètres en intérieur et 300 mètres en extérieur
- La future version de 2020 ,802.11ax aura un débit de 10 Gbit/s

- Cette nouvelle version sera plus adaptée aux objets connectés (capteurs entre autres) grâce à la gestion de la mise en sommeil (fonction target wake time)
- Les débits restent néanmoins impressionnants vis-à-vis des besoins capteurs (10 à 100 bits par message)

IETF

L'Internet Engineering Task Force, élabore et promeut des standards Internet, en particulier les standards qui composent la suite de protocoles Internet. L'IETF produit la plupart des nouveaux standards d'Internet

ISO

ISO : international standard organisation (organisation internationale des normes)
Peu de normes ISO dans les télécommunications.

IEC

ISO et IEC ont établis un comité conjoint, l' ISO/IEC JTC 1

3GPP

3rd Generation Partnership Project (3GPP) est une coopération entre organismes de normalisation en télécommunications tels que : l'UIT (union internationale des télécommunications), l'ETSI (Europe), l'ARIB/TTC ([en](#)) (Japon), le CCSA ([en](#)) (Chine), l'ATIS ([en](#)) (Amérique du Nord) et le TTA (Corée du Sud), qui produit et publie les spécifications techniques pour les réseaux mobiles de 3^e (3G) et 4^e générations (4G).

3GPP assure par ailleurs la maintenance et le développement de spécifications techniques pour les normes mobiles de la famille GSM, notamment pour le GPRS, l'EDGE, l'UMTS, le LTE et le LTE Advanced.

- 3GPP PSS (*packet switched streaming*) est la partie de la norme (à partir de la version 5) qui traite des services audio/vidéo, dont la télévision, sur réseau mobile.
- 3GPP iMB (*integrated mobile broadcast*) est la partie de la norme (à partir de la version 8) qui traite de la diffusion de la télévision sur les cellules radio des services mobiles 3G.

11.5 Rappel sur les ondes sonores et ultrasonores

Il s'agit de vibrations mécaniques faisant intervenir les liaisons électrostatiques entre atomes et molécules (les interactions faibles)

Suivant la gamme de fréquence on parle de sons ou d'ultrasons

0-18 kHz ondes sonores (audibles par l'homme)

> 18 kHz ondes ultrasonores (jusqu'à 10 THz, au-dessus on parle d'hypersons)

Les vibrations dans un fluide sont qualifiées de sons, les vibrations dans un solide de vibrations acoustiques

L'utilisation potentielle d'ondes sonores est principalement dans le domaine de l'eau ou les infrasons de 100 Hz peuvent se propager à longue distance (milliers de kilomètres)

Il serait donc possible de se servir des canalisations d'eau pour transmettre des données entre 2 discontinuités (pompes, réservoirs etc.)

Aujourd'hui on utilise l'émission acoustique des fuites d'eau sur le réseau pour les localiser.

11.6 Exemple de devis pour la réalisation d'un réseau de capteurs par un bureau d'études

L'agence toulousaine du groupe **VIVERIS** a été consultée pour un chiffrage de 3 hypothèses de niveau réseaux de capteurs (niveau prototype, présérie et série) .

Ce chiffrage est estimatif puisque le cahier des charges est succinct. Il permet néanmoins d'avoir une idée des sommes à engager lors de la sous-traitance de projets de ce type.

Les capteurs ne sont pas inclus, seul leur interfaçage avec le réseau.

Les abonnements éventuels aux réseaux (GSM Sigfox Lora) ni les couts d'accès plateforme ne sont inclus.

Les « pièces » signifient les modules émetteurs/recepteurs (node en anglais) sur lesquels sont raccordés plusieurs capteurs (1 à 10) ils envoient les données aux passerelles du réseau (non incluses dans le chiffrage)

Hypothèse 1 : (équivalent PoC – Proof Of Concept)

- Pas de mécanique ou alors boîtier du commerce existant
 - Pas de conception électronique (utilisation de kit existant à intégrer)
 - 10 pièces maximum
 - Fonctionnement sur batterie + prévoir une étude supplémentaire selon les cas d'utilisation.
 - Développement du Firmware : côté système embarqué
 - Récupération des données capteurs par i2C ou SPI ou ADC ou ...
 - Transmission sur 1 système au choix LoRa ou SIGFOX ou LTE
 - Développement du BackEnd : côté stockage des données
 - Développement du FrontEnd : côté utilisateur final
-
- Contraintes :
 - Aucune prise en compte des contraintes mécaniques
 - Prise en compte minimale des contraintes de sécurité

Hypothèse 1 : (équivalent PoC - Proof of Concept)	€ H.T.	Commentaires
Suivi de projet	5 000 €	
Approvisionnement électronique + mécanique	1 000 €	(pour 10 pièces)
Développement Firmware	20 000 €	
Développement du backEnd	17 000 €	
Développement du frontEnd	17 000 €	
Total	60 000 €	

Hypothèse 2 : (équivalent pré-série)

- Conception mécanique de type prototypage, incluant :
 - Phase UX
 - Maquettage
 - Prototypage
 - Présérie
- Conception électronique
 - De 10 à 1000 pièces
 - Fonctionnement sur batterie prévoir une étude supplémentaire selon les cas d'utilisation.
- Développement du Firmware : côté système embarqué
 - Récupération des données capteurs par i2C ou SPI ou ADC ou ...
 - Transmission sur 1 système au choix LoRa ou SIGFOX ou LTE

- Développement du BackEnd : côté stockage des données
 - Développement du FrontEnd : côté utilisateur final
-
- Contraintes :
 - Prise en compte minimale des contraintes de sécurité

Hypothèse 2 : (équivalent pré-série)	€ H.T.	Commentaires
Suivi de projet	30 000 €	
Dossier technique	15 000 €	
Etude Mécanique	45 000 €	(hors fourniture env. 40k€ pour 50 pièces)
Conception électronique	150 000 €	(hors fourniture env. 40k€ pour 50 pièces)
Développement Firmware	60 000 €	
Développement du backEnd	60 000 €	
Développement du frontEnd	60 000 €	
Intégration H/S	20 000 €	
Assemblage mécanique	10 000 €	(10 pièces)
Dossier d'industrialisation	10 000 €	
Total	460 000 €	(hors fourniture env. 80k€ pour 50 pièces)

Hypothèse 3 : (équivalent industrialisation)

- Conception mécanique industrielle
 - Phase UX
 - Maquettage
 - Prototypage
 - Présérie
 - Etude de moulage industriel
- Conception électronique
 - De 1000 à X pièces
 - Fonctionnement sur batterie prévoir une étude supplémentaire selon les cas d'utilisation.
- Développement du Firmware : côté système embarqué
 - Récupération des données capteurs par i2C ou SPI ou ADC ou ...
 - Transmission sur 1 système au choix LoRa ou SYGFOX ou LTE
- Développement du backEnd : côté stockage des données
- Développement du frontEnd : côté utilisateur final
- Gestion d'un Cloud privé
- Dossier de marquage CE (dans le cas d'autre pays, il faudra chiffrer les essais correspondants)

Hypothèse 3 : (équivalent industrialisation)	€ H.T.	Commentaires
Suivi de projet	90 000 €	
Dossier technique	30 000 €	
Dossier de marquage CE	20 000 €	
Essais de certification laboratoire	150 000 €	
Etude Mécanique	180 000 €	(hors fourniture env. 100k€ pour 50 pièces)
Conception électronique	200 000 €	(hors fourniture env. 50k€ pour 50 pièces)
Développement Firmware	60 000 €	
Développement du backEnd	60 000 €	
Développement du frontEnd	60 000 €	
Gestion Multilange et Traduction	10 000 €	
Dossier de validation	150 000 €	(Europe = 10 langues)
Gestion Cloud privé	50 000 €	
Intégration H/S	20 000 €	
Assemblage mécanique	10 000 €	(10 pièces)
Dossier d'industrialisation	10 000 €	
Banc de test de mise en production	50 000 €	
Total	1 150 000 €	(hors fourniture env. 150k€ pour 50 pièces)

Une autre société nous propose une estimation concernant la partie développement informatique
« Licences : entre 50 et 200 keuros (souscription annuelle) suivant la solution Editeur,
l'infrastructure et le nombre d'assets/capteurs connectés.

Developpement application sur plateforme : Entre 100 et 500 keuros suivant la spécificité et la complexité des besoins Métiers versus les fonctions déjà disponibles sur les plateformes IOT sélectionnées.

Attention, il faut aussi penser à chiffrer les coûts de transmissions des données issues des capteurs et les hébergements des serveurs utilisés. »

11.7 LEXIQUE RESEAU

ABBREVIATIONS RÉSEAUX

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ACR	adjacent canal rejection
AES128	advanced encryption standard (norme de cryptage des données)
afa	adaptive frequency agility
AM	Amplitude modulation
anfr	agence nationale des frequences
API	Application programming interface
APN	Acces point name
arcep	Autorité de régulation des communications électroniques et des Postes,
arm	Type de microprocesseur à faible consommation
AWGN	Additive White Gaussian Noise
bande passante	Frequences utilisées pour faire passer des données
BEACON	balise
bps	bit par seconde
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BSS	Business support system
CoAP	Constrained Application Protocol , protocole de l'IOT (client/serveur)
CAT-M1	protocole LTE-M
CCA	clear channel assessment
CDMA	code division multiplexing (type de modulation)
CEPT	conference europeenne des postes et telecommunications
CER	comité europeen des radiocommunications
CHIRP	Compressed High Intensity Radar Pulse
CRA	Central registration authority
CRAN	cloud radio access networks
CRC	Cyclic Redundancy Check(code de verification)
cryptographie assymetrique	la clé de chiffrement est identique au codage et decodage
cryptographie symetrique	la clé de chiffrement est differente au codage et decodage
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSS	Chirp Spread Spectrum
DATA centers	centre de stockage des données
dongle	Dispositif se branchant sur un port USB
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
duty cycle	Temps d'activité d'un processus (ex : 1% pour les réseaux de band libre ISM)
EDGE	Bordure : systeme intermediaire de traitement de données avant envoi à un cloud
eDRX	extended discontinued reception
emitter	emetteur
EPS	Evolved Packet System
ERP	entreprise ressources planning
ETA	Estimated Time Arrival
ethernet	Protocole de liaison filaire entre 2 PC ou PC et routeur
ETSI	European telecommunications standards institute

extranet	réseau privé sur internet
FCC	Commission fédérale des communications
FEC	Forward Error Correction
FFD	full function device
FG-SSC	Focus Group on Smart Sustainable Cities (UIT)
FSK	Frequency-Shift Keying (protocole de transmission)
GFSK	gaussien frequency shift keying(protocole de transmission)
GMSK	Gaussian minimum-shift keying (protocole de transmission)
GPRS	General packet radio service
GSM	Global System for Mobile Communications
GSP	Global Soil Partnership
HAN	home aerea network
HANDOVER	transfert intercellulaire (permet de passer d'un relais à un autre sans interruption)
I2C	Protocole de communication entre des capteurs et un microprocesseur
ICT	information and communication technologies
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	institut of electrical and electronical engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
intranet	réseau local privé utilisant les memes protocoles qu'internet
IO link	Protocole reseau
IoT	Internet of things
IRQ	interruption request
ISM	Bande de frequence pour : Industrie, scientifique et medical
ISO	International Standards Organization
IT	Information technology
LAN	Local Area Network
LBT	listen before talk (ecoute avant d'envoyer: evite les interferences)
LiFi Light Fidelity	Transmission par voie optique
lock-in	enfermement propriétaire
LORA	Long range (reseau longue portée , plusieurs kilometres)
LORAWAN	Long range wide area network (protocole reseau longue portée) et association du même nom
LoS	line of sight (à vue , c'est-à-dire dans obstacle diminuer la transmission)
LPWAN ou LoPWAN	Low power wide area network
LRTAP	Long-range Transboundary Air Pollution
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
LTE-M	LTE machine
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Message authentication code ou Medium Access Control
MAC and PHY layer	Couches adresse et physique
MCM	multi channel multiplexing
MCU	micro controller unit
MIC	modulation par impulsion et codage
MIMO (antenne)	Multiple-Input Multiple-Output (antenne multiple) 5G

MQTT proxy	Protocole informatique
MTC	Machine Type Communication
MTEs	Ministere de la transition ecologique et solidaire
NAK	Network authentication key
NB	Narrowband
NB-IoT	Narrow Band IoT
NFC	near field communication
NOC	Network operation centre
OFDM	orthogonal frequency-division multiplexing
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (pour 4G,5G LTE)</i>
OOK	on off keying (systeme de modulation)
OSI	Open Systems Interconnection
OSS	Operation support system
OTA	Over the air (changement de programme par les airs)
PAC	Porting authorisation code
PAN-id	adresse d'un réseau PAN (personal area network)
PAR	puissance apparente rayonnée
PER	Packet Error Rate
PIRE	puissance isotrope rayonnée équivalente
PLC	power line communication
PN	Pseudo-Noise
PSM	power saving mode (mode veille)
QoS	Quality of Service
receiver	recepteur
REST	Protocole IOT (concurrent à MQTT et CoAP)
RF	Radio frequency
RFD	reduce function device (zigbee)
RSA	algorithme de cryptographie
rsi	Received Signal Strength Indication
RTS/CTS	Request to Send/Clear to Send
RU	Resource Unit
SCEF	Service Capability Exposure Function
SCHC	Static Context Header Compression
SDR	Software-Defined Radio
SEQ	Système d'Evaluation de la Qualité des eaux
SF	Spreading Factor
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SIR	Signal-to-Interference
SNR	signal on noise ratio
soc	system on a chip
soc	state of charge (battery)
soh	state of health
SPI	serial peripheral interface
SRD	short range devices
TDMA	time division multiplexing
TNRBF	tableau national de repartition des bandes de frequence

TPM	Trusted platform module
transceiver	dispositif combinant emetteur et recepteur
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UIT	Union Internationale des Telecommunications
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
UNB	ultra narrow band
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
VPN	Virtual private network
whip antenna	antenne fouet
WiFi	wireless fidelity
WiMax	worldwide interoperability for microwave access
WLAN	Wireless Local Area Network
wsn	wireless sensor network