

**SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT**  
FRANÇAIS / ENGLISH

**SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE DES SITES  
INDUSTRIELS ET URBAINS**  
**UTILISATION DE RESEAUX DE CAPTEURS ENVIRONNEMENTAUX**  
**ETAT DE L'ART TECHNICO-ECONOMIQUE**

**ENVIRONMENTAL MONITORING  
OF INDUSTRIAL AND URBAN SITES**  
**USE OF ENVIRONMENTAL SENSOR NETWORKS**  
**STATE OF THE TECHNICO-ECONOMIC ART**

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](http://www.ademe.fr)

© 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 demande de surveillance environnementale des émissions polluantes. 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 et l'IOT (internet des objets), suggère l'opportunité de constituer des réseaux de capteurs environnementaux, utilisant ces réseaux de télécommunications, pour répondre à ce besoin.

L'étude a consisté dans un premier temps à recenser les lois, normes, directives ou motivations diverses susceptibles d'encourager l'utilisation de réseaux de capteurs environnementaux. D'après notre analyse, la notion de réseau de capteurs environnementaux est absente dans la législation actuelle en France et en Europe.

Dans un deuxième temps nous avons établi la liste des réseaux de télécommunications existants susceptibles d'être utilisés pour surveiller l'environnement et comparé les technologies disponibles. Face à la complexité dans les choix possibles, nous avons identifié les architectures réseaux pouvant correspondre à des configurations type. Une combinaison de plusieurs réseaux 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 et bon marché. L'offre capteurs 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**

Réseau de capteurs environnementaux, IOT, objets connectés, réseaux de télécommunications, 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.

## Contexte

Depuis plusieurs années, les besoins en termes de surveillance environnementale des émissions de polluants ne cessent d'augmenter sous l'effet d'une réglementation française et européenne de plus en plus exigeante. Cette surveillance peut conduire à de lourds investissements en équipements, gestion des données et exploitation des analyses. Le suivi environnemental repose généralement sur des équipements analytiques sophistiqués et coûteux qu'il faut calibrer périodiquement. Dans la majorité des cas, ces mesures se font par prélèvement d'échantillons, suivi d'une analyse ultérieure en laboratoire, ce qui est particulièrement le cas dans le domaine de l'eau. Ces procédures lourdes et coûteuses limitent le nombre de mesures et leur fréquence d'acquisition. Elles sont parfois complétées par la simulation pour prédire et décrire les pollutions à une échelle plus petite.

Depuis 10 ans, l'apparition de réseaux sans fil, longues et très longues distances, impulsés par la société française SIGFOX et son réseau du même nom, offre des perspectives très intéressantes pour le suivi des émissions liquides, solides et gazeuses de zones d'activités humaines, de sites industriels, de sites urbains ..., et la possibilité d'augmenter la fréquence d'analyse et de multiplier les mesures in situ. Toutefois, le développement des offres de réseaux de télécommunication, la montée en puissance des objets connectés et la notion d'internet de objets (IOT) rendent difficiles les choix entre les nombreuses solutions mises à disposition ou à développer.

## Objectifs

Cette étude avait pour objectifs (i) de déterminer les besoins de surveillance environnementale sur les sites industriels ou urbains pouvant susciter l'utilisation de réseaux, (ii) étudier l'offre en réseaux de télécommunication potentiellement utilisables, l'offre technologique sur les capteurs devant être abordée de manière synthétique, cette approche scientifique, technique et opérationnelle ayant pour finalité de dénouer la complexité de la chaîne complète constituant un réseau de capteurs environnementaux, depuis l'interfaçage des capteurs jusqu'au traitement des données qui en sont issues.

## Méthodologie et plan de l'étude

L'étude a été organisée en plusieurs tâches :

- Analyse des « besoins en surveillance environnementale » en utilisant les réseaux sociaux tels que linkedin (plus de 100 demandes) et les organigrammes de collectivités territoriales (régions, départements, métropoles ou communes), des ministères, et des entreprises ;
- Analyse de l'offre « 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 ;
- Analyse des « retours d'expériences » en interrogeant les responsables des laboratoires ayant participé aux principaux projets de recherche identifiés ;
- Analyse bibliographique quasi exhaustive des réglementations et guides concernant l'environnement a été entrepris au niveau communal, départemental, régional, national, européen et mondial, présentée dans un rapport annexe.

## The context

*For several years, the needs in terms of environmental monitoring of pollutant emissions have continued to increase under the effect of increasingly stringent French and European regulations. This monitoring can lead to heavy investments in equipment, data management and analysis exploitation. Environmental monitoring generally relies on sophisticated and expensive analytical equipment that must be calibrated periodically. In the majority of cases, these measurements are made by taking samples, followed by a subsequent laboratory analysis, which is particularly the case in the water sector. These cumbersome and costly procedures limit the number of measurements and their frequency of acquisition. They are sometimes supplemented by simulation to predict and describe pollution on a smaller scale.*

*For 10 years, the appearance of wireless networks, long and very long distances, driven by the French company SIGFOX and its network of the same name, has offered very interesting prospects for monitoring liquid, solid and gas emissions from areas of human activities, industrial sites, urban sites, etc., and the possibility of increasing the frequency of analysis and multiplying in situ measurements. However, the rapid increase of telecommunications network offers, the rise of connected objects (Internet of Things (IOT)) make it difficult to choose between the many solutions available or to be developed.*

## Goals

*The objectives of this study were (i) to determine the environmental monitoring needs on industrial or urban sites that may trigger the use of networks, (ii) to study the supply of potentially usable telecommunication networks, the technological offer on sensors to be approached in a synthetic way, this scientific, technical and operational approach having for finality to untie the complexity of the complete chain constituting a network of environmental sensors, from the interfacing of the sensors to the processing of the data which result from it.*

## Methodology and study plan

*The study was organized into several tasks:*

- *Analysis of "environmental monitoring needs" using social networks such as linkedin (more than 100 requests) and organizational charts of local authorities (regions, departments, metropolitan areas or municipalities), ministries, and companies;*
- *Analysis of the "network" offer by alternating bibliographic study on the Internet and telephone interviews with component distributors, manufacturers of sensors or sensor modules, design offices, IT service companies, telecommunications operators;*
- *Analysis of "feedback" by interviewing the heads of the laboratories that participated in the main research projects identified;*
- *Almost exhaustive bibliographic analysis of environmental regulations and guides was undertaken at municipal, departmental, regional, national, European and global level, presented in an annex report.*

*The report is structured in two parts:*

***The first part concerns environmental monitoring: what are the expressed needs, obligations and motivations of manufacturers and communities. The societal challenges of***

Le rapport est structuré en deux parties :

**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 précisés. La surveillance actuelle est décrite à la fois en termes de polluants à surveiller et en termes d'outils de suivi. Les enjeux capteurs sont mis en exergue ;

**La deuxième partie concerne spécifiquement les réseaux de capteurs** et, plus particulièrement, la partie technique liée aux réseaux de télécommunications sans fil : Qu'est-ce qu'un réseau ? Quelle technologie choisir et comment le mettre en œuvre ? Des exemples concrets, correspondant à différents scénarios de surveillance, sont proposés ainsi qu'une analyse des retours d'expériences.

Le rapport principal est complété par un rapport complémentaire constitué de plusieurs annexes permettant un approfondissement des principaux points abordés au cours de cette étude.

## Les principaux résultats obtenus

### Les besoins de surveillance environnementale

#### **Obligations et motivations des acteurs :**

Les industriels sont tenus à une surveillance environnementale de leurs installations définie dans des arrêtés préfectoraux.

Sur la base de la législation française issue de la réglementation de l'Union Européenne, le suivi de polluants dans l'air extérieur est assuré par un réseau d'environ 800 stations de mesures fixes, constitué par les AASQA (association agréée de surveillance de la qualité de l'air), comme par exemple Airparif. La surveillance de l'eau, tout comme celle des sites pollués, est principalement assurée par des prélèvements suivis d'analyses effectuées en laboratoires.

Dans le domaine des sites pollués, il n'existe pas de liste réglementaire pour le suivi des polluants. Chaque suivi environnemental d'un site pollué fait l'objet d'une démarche spécifique selon sa configuration (matrices à suivre eau et/ou gaz) et son historique (liste de polluants à rechercher).

Une liste des polluants susceptibles d'être recherchées sur l'ensemble des sites pollués est fournie dans le rapport d'étude.

#### **Lien entre les paramètres et polluants suivis et la possibilité d'insertion dans un réseau de capteur :**

Dans le domaine de l'air extérieur : / *In the domain of air pollution:*

polluants	name	Possible insertion in a sensor network
NOx	Nitrogen oxydes	yes
PM10 et PM2.5	Fine particules in suspension	yes
SO2	Sulfur dioxyde	yes
O3	Ozon	yes
CO	Carbon monoxyde	yes
VOC	Volatil organic compounds	yes ([VOC] total)
PAH	polycyclic aromatic hydrocarbons	
Heavy metals	lead, cadmium, arsenic, nickel	

*environmental monitoring are specified. Current monitoring is described both in terms of pollutants to monitor and in terms of monitoring tools. The issues of sensors are highlighted;*

**The second part specifically concerns sensor networks and, more specifically, the technical part related to wireless telecommunications networks: What is a network? Which technology to choose and how to implement it? Concrete examples, corresponding to different monitoring scenarios, are offered as well as an analysis of feedback.**

*The main report is supplemented by a complementary report made up of several appendices allowing a more in-depth look at the main points addressed during this study.*

## The main results obtained

### Environmental monitoring needs

#### **Obligations and motivations of the actors:**

*Manufacturers are required to carry out environmental monitoring of their facilities defined in prefectural decrees.*

*On the basis of French legislation resulting from European Union regulations, the monitoring of pollutants in the outdoor air is ensured by a network of around 800 fixed measurement stations, made up of the AASQA (approved association for the monitoring of air quality), such as Airparif. Water monitoring, like that of polluted sites, is mainly carried out by sampling followed by analyzes carried out in laboratories.*

*In the area of polluted sites, there is no regulatory list for monitoring pollutants. Each environmental monitoring of a polluted site is the subject of a specific process depending on its configuration (water and / or gas matrices to be monitored) and its history (list of pollutants to be searched for).*

*A list of pollutants likely to be searched for at all polluted sites is provided in the study report.*

#### **Link between the parameters and pollutants monitored and the possibility of insertion in a sensor network:**

Dans le domaine de l'eau : / In the domain of water:

	Drinkable water	Waste water	rain	Rivers/lakes	Possible insertion in a sensor network
	63 parameters				
Height		X	x	x	yes
Flow	x	X	x	x	yes
Leakage	x	X	x		yes
pH/temperature	x			x	yes
Suspended matter				x	
Turbidity	x			x	yes
hardness					
Ions (Cl, K, Na etc.)	x				yes
Nitrates, fluor	x				
Metals	x				
HAP	x				
Hydrocarbons	x				
CDO		X		x	By UV
BDO		X		x	
Dissolved O2	x			x	yes
Microbiology	x		x	x	
Micro-plastics				x	
endocrine disruptors	x	X		x	

**Les enjeux capteurs :**

Dans le domaine de l'air, l'offre en capteurs et microcapteurs reste limitée à la température, humidité, bruits et la détection de microparticules, et de molécules gazeuses telles que CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S. Le « challenge microcapteurs » organisé chaque année depuis 2018 par AIRLAB a montré que la fiabilité faisait souvent défaut et que le prix des capteurs n'était pas corrélé à leurs performances. Les microcapteurs actuellement disponibles sur le marché manquent de fiabilité et de stabilité dans le temps. Ils sont sujets à des interférences entre l'espèce chimique ciblée et d'autres espèces chimiques présentes, particulièrement lorsqu'il s'agit de capteurs électrochimiques.

Dans le domaine de l'eau, les capteurs ultrasonores de mesure de la hauteur d'eau, 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 de type GSM, voire téléphonie fixe.

Dans le domaine des sites pollués, les enjeux portent sur l'adaptation des capteurs développés dans les domaines de l'eau et de l'air ou au développement de capteurs spécifiques, qui soient adaptés aux contraintes propres [ex : dispositifs adaptés à leurs mises en place au sein d'ouvrages de type piézomètres, piézajirs ou directement dans les sols (gaz du sol)].

A l'heure actuelle, il n'existe pas de microcapteurs dédiés à l'analyse des principaux polluants cibles tels que les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), BTEX (Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes), PCB (polychlorobiphényles), COVH (COV halogénés), métaux (Hg, Cd, Pb, As), pesticides, et perturbateurs endocriniens.

**The challenges of sensors:**

*In the air sector, the supply of sensors and microsensors remains limited to temperature, humidity, noise and the detection of microparticles, and gas molecules such as CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S. The "micro-sensor challenge" organized each year since 2018 by AIRLAB showed that reliability was often lacking and that the price of the sensors was not correlated with their performance. Microsensors currently available on the market lack reliability and stability over time. They are subject to interference between the target chemical species and other chemical species present, particularly when it comes to electrochemical sensors.*

*In the water sector, ultrasonic water height measurement sensors, flow meters, optical dissolved oxygen probes and pH or ion probes allow remote monitoring that has been used for more than 15 years thanks to GSM type radio links, or even fixed telephony.*

*In the field of polluted sites, the challenges relate to the adaptation of sensors developed in the fields of water and air or to the development of specific sensors, which are adapted to specific constraints [eg: devices adapted to their applications. in place in piezometer, piezoelectric type structures or directly in the soil (soil gas)].*

*At present, there are no microsensors dedicated to the analysis of the main target pollutants such as PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons), BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylenes), PCB (polychlorinated biphenyls), COVH (Halogenated VOCs), metals (Hg, Cd, Pb, As), pesticides, and endocrine disruptors.*

## **Les besoins en réseaux de capteurs environnementaux**

Nous n'avons pas décelé un intérêt manifeste pour les réseaux de capteurs environnementaux dans les administrations (collectivités, ministères, etc.), ni dans l'industrie en général, hormis chez les membres de l'association RECORD à l'origine de cette étude.

Seules les grandes entreprises actives dans la distribution d'eau ou d'électricité ont mis en place des réseaux de transmission de données, en majorité sans fil, pour effectuer la télérelève des compteurs.

Le développement conjoint de microcapteurs pour détecter certains gaz « simples » et de réseaux sans fil faible coût, a permis l'émergence de startup qui proposent des microcentrales de surveillance de la qualité de l'air connectées en réseaux, à la fois industrielles, d'un coût encore très élevé (plusieurs milliers d'euros), 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 microparticules, et de molécules gazeuses telles que CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S. Le « challenge microcapteurs » organisé chaque année depuis 2018 par AIRLAB a montré que la fiabilité faisait souvent défaut et que le prix des capteurs n'était pas corrélé à leurs performances. Les microcapteurs actuellement disponibles sur le marché manquent de fiabilité et de stabilité dans le temps. Ils sont sujets à des interférences entre l'espèce chimique ciblée et d'autres espèces chimiques présentes, particulièrement lorsqu'il s'agit de capteurs électrochimiques.

Dans le domaine de l'eau, les capteurs ultrasonores de mesure de la hauteur d'eau, 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 de type GSM, voire téléphonie fixe. A l'heure actuelle, il n'existe pas de microcapteurs dédiés à l'analyse des principaux polluants cibles tels que les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), BTEX (Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes), PCB (polychlorobiphényles), COVH (COV halogénés), métaux (Hg, Cd, Pb, As), pesticides, et perturbateurs endocriniens.

## **Les réseaux de télécommunications sans fil**

Après la présentation détaillée des différentes couches logicielles qui lient les composants électroniques constitutifs d'un réseau (ensemble de dispositifs reliés entre eux), nous décrivons les 4 grandes familles de réseaux de télécommunications pouvant servir pour créer des solutions complètes de réseaux de capteurs :

- Les réseaux utilisant les réseaux GSM (dits cellulaires) déployés pour les téléphones portables et pouvant véhiculer des données, avec une couverture nationale et internationale. Ces réseaux sont gérés par des opérateurs de télécommunication. Leur accès nécessite un abonnement. Leur débit est nettement supérieur à celui nécessaire pour les capteurs. Leur portée peut atteindre plusieurs kilomètres. L'autonomie des dispositifs raccordés est faible (quelques jours). Deux réseaux récents basés sur ces réseaux GSM permettent une autonomie plus longue grâce à la mise en sommeil des capteurs : LTE-M et NB-IOT ;
- Les réseaux longue distance LPWAN (low power wide area network de type LORA ou SIGFOX), de portée plusieurs kilomètres : certains ont une couverture nationale voire internationale, avec ou sans abonnement. Leur portée peut atteindre 15 km. Si leur débit est faible, il est toutefois suffisant

## **The needs for environmental sensor networks**

*We have not detected a clear interest in environmental sensor networks in administrations (communities, ministries, etc.), nor in industry in general, except among members of the RECORD association at the origin of this study.*

*Only large companies active in the distribution of water or electricity have set up data transmission networks, mostly wireless, to perform remote meter reading.*

*The joint development of microsensors to detect certain "simple" gases and of low-cost wireless networks has enabled the emergence of startups which offer air quality monitoring devices connected in networks, both industrial, at costs that are still very high (several thousand euros), and domestic devices, of moderate costs (a few hundred euros or even a few tens of euros).*

*However, the supply of sensors and microsensors remains limited to temperature, humidity, noise and the detection of microparticles, and gas molecules such as CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S. The "micro-sensor challenge" organized each year since 2018 by AIRLAB showed that reliability was often lacking and that the price of the sensors was not correlated with their performance. Microsensors currently available on the market lack reliability and stability over time. They are subject to interference between the target chemical species and other chemical species present, particularly when it comes to electrochemical sensors.*

*In the water sector, ultrasonic water height measurement sensors, flow meters, optical dissolved oxygen probes and pH or ion probes allow remote monitoring that has been used for more than 15 years thanks to GSM type radio links, or even fixed telephony. At present, there are no microsensors dedicated to the analysis of the main target pollutants such as PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons), BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylenes), PCB (polychlorinated biphenyls), COVH (Halogenated VOCs), metals (Hg, Cd, Pb, As), pesticides, and endocrine disruptors.*

## **Wireless telecommunications networks**

*After a detailed presentation of the different software layers that link the electronic components that constitute a network (set of devices linked together), we describe the 4 major families of telecommunications networks that can be used to create complete sensor network solutions:*

- *Networks using GSM networks (called cellular) deployed for mobile phones and capable of carrying data, with national and international coverage. These networks are managed by telecommunications operators. Access to them requires a subscription. Their flow rate is clearly higher than that required for the sensors. Their range can reach several kilometers. The autonomy of the connected devices is low (a few days). Two recent networks based on these GSM networks allow a longer autonomy thanks to the sleep mode of the sensors: LTE-M and NB-IOT;*
- *LPWAN (low power wide area network of the LORA or SIGFOX) long-distance networks, with a range of several kilometers: some have national or even international coverage, with or without subscription. Their range can reach 15 km. If their flow rate is low, it is however sufficient for sensors. Their consumption is very low and an autonomy of several years is possible with a battery, according to the frequency of the data transmission;*

pour des capteurs. Leur consommation est très faible et une autonomie de plusieurs années est possible avec une pile, selon la fréquence de la transmission des données ;

- 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 et bluetooth), de portée inférieure à 100 mètres. Reliés à internet, ils sont donc en concurrence avec les réseaux longue distance lorsqu'un accès à internet est possible via une box ou un modem 4G. Cette solution est très économique et ne nécessite pas d'abonnement (sauf celui d'une box standard).

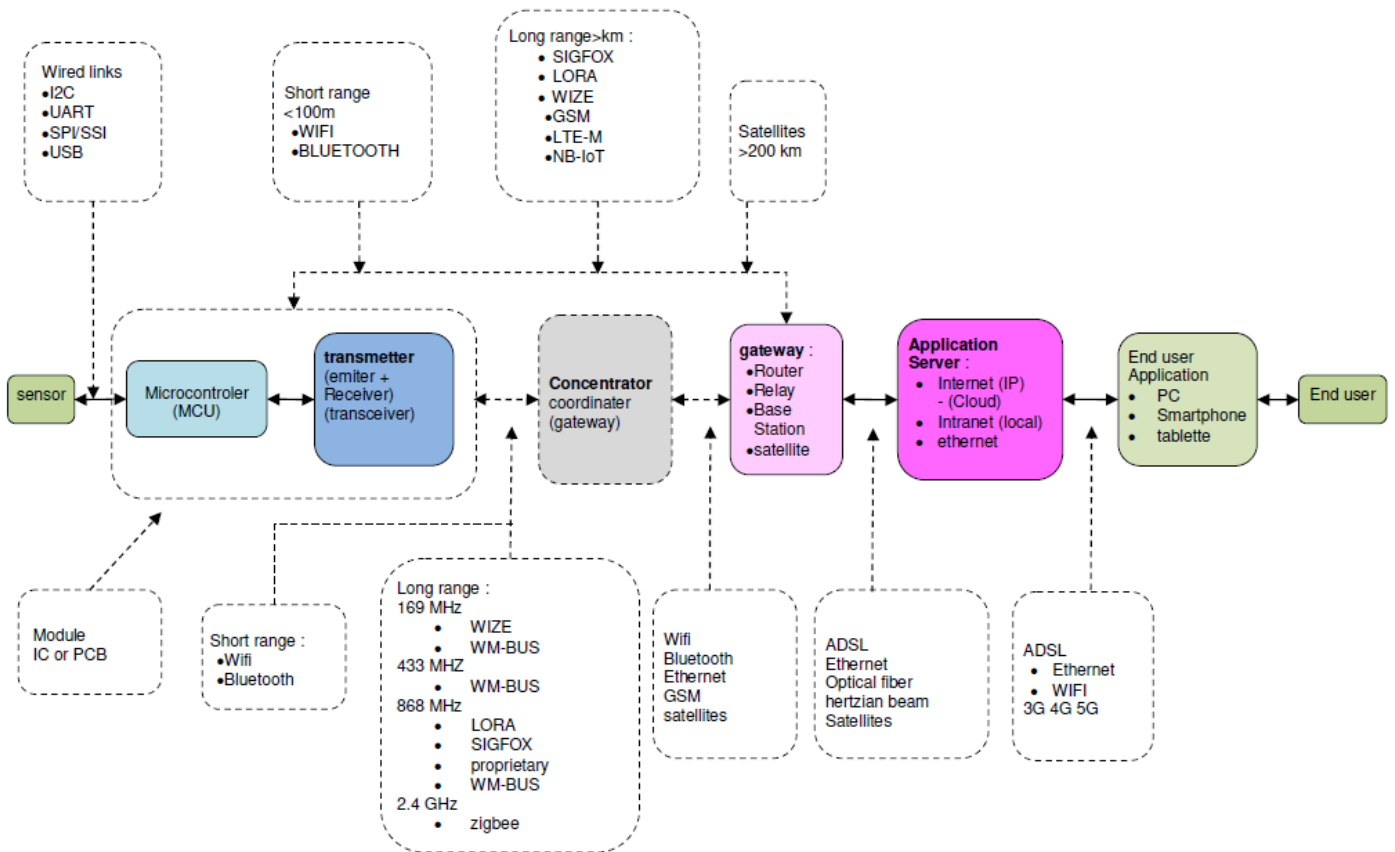
**Quelle technologie de réseaux de télécommunications choisir et comment la mettre en œuvre pour constituer un réseau de capteurs sans fil**

Le schéma suivant illustre la multiplicité des solutions de réseaux de télécommunications sans fil pouvant être utilisées pour constituer une solution complète de réseau de capteurs et la complexité des choix.

- *Satellite networks providing links where no terrestrial network is present;*
- *Short-distance local area networks LAN (local area network of the wifi and bluetooth type), with a range of less than 100 meters. Connected to the internet, they are therefore in competition with long distance networks when internet access is possible via a box or a 4G modem. This solution is very economical and does not require a subscription (except that of a standard box).*

**Which telecommunications network technology to choose and how to implement it to form a wireless sensor network?**

*The following diagram illustrates the multiplicity of wireless telecommunications network solutions that can be used to build a complete sensor network solution and the complexity of the choices.*



**Figure 1 : Schéma générique d'un réseau de capteur (RECORD, 2021)**  
*Figure 1: Sensor network generic scheme (RECORD, 2021)*

Une solution complète de réseau de capteur est proposée pour 7 scénarios de surveillance sélectionnés permettant de couvrir quasiment tous les cas de figures possibles. Pour constituer ces réseaux de capteurs complets, nous avons retenu 8 réseaux de télécommunications sans fil différents : LORA, SIGFOX, NB-IOT, LTE-M, cellulaires, WIFI, Bluetooth et Constellations satellitaires.

*A complete sensor network solution is offered for 7 selected monitoring scenarios to cover almost all possible scenarios. To constitute these complete sensor networks, we have chosen 8 different types of telecommunications networks: LORA, SIGFOX, NB-IOT, LTE-M, cellular, WIFI, Bluetooth and Satellite constellations.*



Le choix des solutions proposées tient compte des débits, de l'autonomie, de la portée, de la couverture réseau, de la qualité de services, de la sécurité, de la pérennité des sociétés et des réseaux ainsi que des coûts.

**Scenario 1** : surveillance de la qualité de l'air, de l'eau et des sols en France :

- Site de dépollution de sols en milieu urbain
- Dimension 200 m x 200 m
- Transmission des données (5 paramètres à la minute)

**Scénario 2** : surveillance de la qualité de l'air, de l'eau et des sols en Europe :

- 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

**Scenario 3** : surveillance de la qualité de l'air et de l'eau en Europe :

- Un site industriel ou un site industriel ou urbain bien desservi en internet
- Surface totale 2x2 km
- Transmission des données (5 paramètres) par minute

**Scénario 4** : surveillance de la qualité de l'air, de l'eau et des sols en Europe :

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

**Scénario 5** : surveillance de la 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

**Scenario 6** : surveillance de la qualité de l'air par un ensemble de capteurs mobiles (véhicules, vélo, bus) :

- Débit de données non spécifié

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

- métro, tunnels, mines, rivières et cavités souterraines

*The choice of proposed solutions takes into account speeds, autonomy, range, network coverage, quality of service, security, sustainability of companies and networks as well as costs.*

**Scenario 1**: *monitoring the quality of air, water and soil in France:*

- *Urban soil remediation site*
- *Dimension 200 m x 200 m*
- *Data transmission (5 parameters per minute)*

**Scenario 2**: *monitoring the quality of air, water and soil in Europe:*

- *A polluted site*
- *Or an industrial or urban site with poor internet access*
- *Or a landfill site*
- *Data transmission (5 parameters) per minute*

**Scenario 3**: *monitoring air and water quality in Europe:*

- *An industrial site or first industrial or urban site well served by internet*
- *Total area 2x2 km*
- *Data transmission (5 parameters) per minute*

**Scenario 4**: *monitoring the quality of air, water and soil in Europe:*

- *Landfill installation*
- *Data transmission (5 parameters) every 15 to 30 minutes*

**Scenario 5**: *monitoring the quality of air, water and soil in a part of the world not covered by a terrestrial network:*

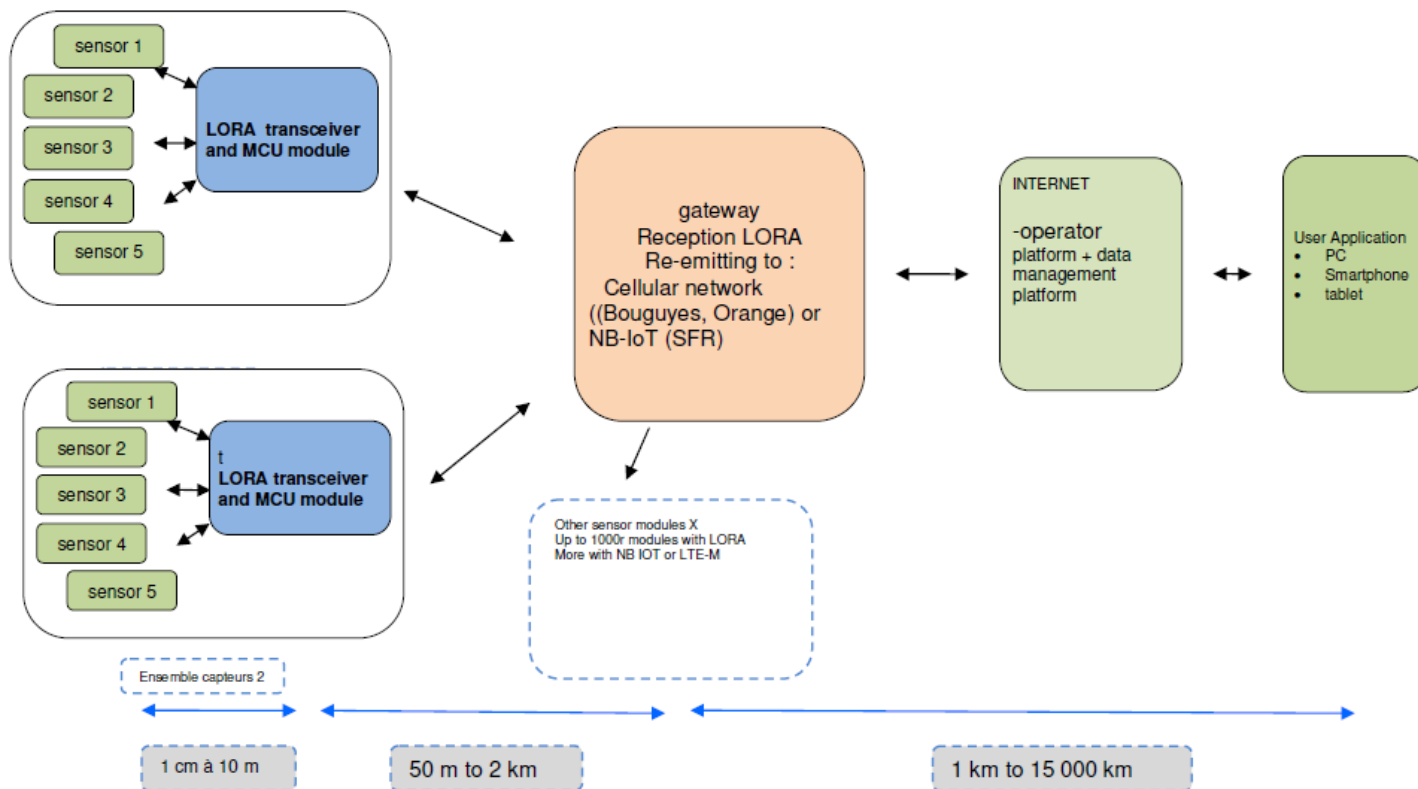
- *Data transmission (5 parameters) every 15 to 30 minutes*

**Scenario 6**: *air quality monitoring by a set of mobile sensors (vehicles, bicycle, bus):*

- *Data rate not specified*

**Scenario 7**: *monitoring the quality of air, water and soil in confined underground spaces:*

- *Subway, tunnels, mines, rivers and underground cavities*



**Figure 2 : Scénario 1 site pollué ou site industriel en FRANCE sans couverture LORA mais GSM (RECORD, 2021)**  
**Figure 2 : Scenario 1 polluted or industrial site in FRANCE without LORA coverage but GSM (RECORD, 2021)**

La gestion des données reste un élément important dans l'établissement d'un réseau de capteurs. Google Amazon et Microsoft proposent des outils logiciels et des plateformes de gestion des capteurs et des données. D'autres sociétés de services informatiques ont développé des plateformes pouvant être personnalisées. Un développement ex nihilo serait peu judicieux.

Une analyse des acteurs de la chaîne complète d'un réseau de capteurs est proposée : fabricants de semi-conducteurs, de modules, distributeurs de composants, fabricants d'équipements de télécommunication, intégrateurs, société de services informatiques. Une analyse de la valeur détaillée au niveau composant donne une visibilité sur les coûts matière d'un réseau.

Une estimation des coûts de sous-traitance logicielle ou d'intégration globale est réalisée.

Des exemples de devis de sous-traitance complète sont proposés.

### **Retour d'expériences de choix de réseaux de télécommunication sans fil**

Quelques retours d'expériences permettent de conforter les choix de réseaux de télécommunications sans fil présentés dans les 7 scénarios sélectionnés, en particulier l'utilisation du réseau LORA, tant sous sa version opérateur que sa version privée. Une expérimentation réussie de réseau LORA a été lancée en 2016 par un laboratoire spécialisé dans les technologies de l'IOT : Icube (UMR 7357, CNRS) à Strasbourg. Les conclusions de ce projet (et pour partie celles d'autres) sont les suivantes :

*Data management remains an important part of building a sensor network. Google Amazon and Microsoft offer software tools and platforms for managing sensors and data. Other IT service companies have developed platforms that can be customized. Development from scratch would be then unwise.*

*An analysis of the players of the complete chain of sensor networks is offered: semiconductor and module manufacturers, component distributors, telecommunications equipment manufacturers, integrators, IT services companies. Detailed value analysis at the component level provides visibility into the material costs of a network.*

*An estimate of the costs of software outsourcing or global integration is carried out.*

*Examples of full subcontracting quotes are provided.*

### **Feedback on the choice of wireless telecommunications networks**

*Some experience feedback helps to confirm the choices of wireless telecommunications networks presented in the 7 selected scenarios, in particular the use of the LORA network, both in its operator version and in its private version. A successful LORA network experiment was launched in 2016 by a laboratory specializing in IOT technologies: Icube (UMR 7357, CNRS) in Strasbourg. The conclusions of this project (and in part those of others) are as follows:*

- *A pre-project to deploy connected instruments using zigbee mesh networks turned out to be too restrictive because the maximum distance of 50 meters between each node required a network that was too dense;*
- *Highlighting the importance of positioning the antennas;*

- Un pré projet de déploiement d'instruments connectés à l'aide de réseaux maillés zigbee s'est révélé trop contraignant car la distance maximale de 50 mètres entre chaque nœud nécessitait un réseau trop dense ;
- Mise en évidence de l'importance du positionnement des antennes ;
- Importance du formatage des données transmises ;
- Il faut soigner les mises à jour par le réseau (OTA, over the air) pour homogénéiser le système ;
- Nécessité d'installer des systèmes ouverts (capteurs, groupe de capteurs, modules capteurs) pour faciliter les interfaçages (complexes) 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 ;
- Avec quelques dizaines de milliers d'euros on peut couvrir une ville autorisant des objets connectés partout ;
- Intérêt financier de posséder sa propre infrastructure LORAWAN qui permet d'éviter les offres verticales segmentées (réseaux de capteurs spécifiques avec traitement spécifique).

Quelques expérimentations de flottilles de capteurs de particules dans de grandes villes existent et sont destinées essentiellement à des fins de communication. Ces flottilles de véhicules munis d'un boîtier comprenant plusieurs capteurs utilisent principalement le réseau cellulaire (2G, 3G, 4G). La portée des réseaux est fortement influencée par la hauteur des antennes à la fois des capteurs et celles des passerelles par lesquelles les signaux transitent vers des serveurs.

## Conclusions

Les réseaux de télécommunications sans fil sont proches de la maturité et leur déploiement est en cours pour les activités IOT dans les lieux dits « intelligents » (ville, agriculture, industrie, bâtiment, parking, médecine) et les portables (vêtements, montres, appareils de soins infirmiers, ...). Toutefois, les besoins de réseaux de capteurs environnementaux ne sont pas clairement identifiés et encore peu exprimés. L'offre de solution complète de réseaux de capteurs environnementaux disponibles sur catalogue n'existe pas à l'heure actuelle.

Le développement et l'utilisation des réseaux de capteurs environnementaux est aujourd'hui freinée par :

- L'offre limitée de capteurs fiables, bas coût, et les difficultés de gérer leur dérive dans le temps (calibrations difficiles à effectuer après installation) ;
- La diversité des polluants cibles nécessitant un suivi (pesticides, HAP, etc.) ;
- Le coût des solutions complètes de réseaux « clé en main » ;
- L'absence d'une solution réseau de télécommunication sans fil universelle et la difficile interopérabilité entre modules capteurs de différentes marques ;
- Un marché de niche qui n'intéresse pas les principaux acteurs de l'analyse (solutions standards domestiques peu fiables ou solutions chères sur mesure faites par des TPE/PME).

La complexité logicielle et composants de la chaîne complète constitutive d'un réseau de capteur impose l'utilisation d'une sous-traitance multi expertise.

Les réseaux de capteurs vont générer des millions de données à traiter et exploiter. Les challenges suivants seront à prendre en compte :

- Quid de l'utilisation des données (valorisation des données, pour qui, pour quoi ?
- Implication de Google, Amazon et Microsoft dans les capteurs et les données, risques ou opportunités ?

- Importance of formatting of transmitted data;
- Care must be taken with network updates (OTA, over the air) to homogenize the system;
- Need to install open systems (sensors, group of sensors, sensor modules) to facilitate (complex) interfacing and avoid obsolescence in the event of the disappearance of a company: use ready-to-use modules that just register on any platform and activate;
- With a few tens of thousands of euros we can cover a city allowing connected objects everywhere;
- Financial advantage of having its own LORAWAN infrastructure which makes it possible to avoid segmented vertical offers (networks of specific sensors with specific processing).

A few experiments with particle sensor fleets in large cities exist and are primarily intended for communication purposes. These vehicle fleets equipped with a box comprising several sensors mainly use the cellular network (2G, 3G, 4G). The range of networks is strongly influenced by the height of the antennas of both the sensors and those of the gateways through which the signals pass to the servers.

## Conclusions

Wireless telecommunications networks are nearing maturity and their deployment is underway for IOT activities in so-called "smart" places (city, agriculture, industry, building, parking, medicine) and wearables (clothing, watches, devices, Nursing). However, the needs for environmental sensor networks are not clearly identified and still little expressed. A complete environmental sensor network solution, available from the catalog, does not currently exist.

The development and use of environmental sensor networks is currently hampered by:

- The limited supply of reliable, low-cost sensors and the difficulties of managing their drift over time (calibrations difficult to perform after installation);
- The diversity of target pollutants requiring monitoring (pesticides, PAHs, etc.);
- The cost of complete "turnkey" network solutions;
- The lack of a universal wireless telecommunications network solution and the difficult interoperability between sensor modules of different brands;
- A niche market that does not interest the main players in the analysis (unreliable domestic standard solutions or expensive tailor-made solutions made by VSEs / SMEs).

The complexity of the software and components of the complete chain constituting a sensor network requires the use of multi-expertise subcontracting.

Sensor networks will generate millions of data to be processed and used. The following challenges will have to be taken into account:

- What about the use of data (valuation of data, for whom, for what?
- Involvement of Google, Amazon and Microsoft in sensors and data, risks or opportunities?

## Perspectives on "wireless telecommunications networks"

IOT marketing studies predict that the market will be dominated by LORA and NB-IOT in the coming years. The SIGFOX network should be watched as restructuring is to be expected both in the SIGFOX company and in the physical

### **Perspectives « réseaux de télécommunications sans fil »**

Les études marketing sur l'IOT prédisent que le marché sera dominé par LORA et le NB-IOT dans les années qui viennent. 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 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 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.

### **Perspectives « Traitement des données »**

Dans la profusion des logiciels de programmation des capteurs, passerelles, routeurs, 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.

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 développé autour de linux et la raspberry ou arduino.

*and software network. The NB-IoT network still suffers in France from being dependent on a single operator, SFR and its poor surface coverage (around 50%). However, it has opportunities for progression thanks to its higher throughput than LORA and its increased level of security. GSM M2M networks will see the advent of 5G within 5 years, which will mainly benefit Industry 4.0 and large file transfer. The satellite networks, currently being deployed, will certainly complement the network offer advantageously within 3 to 5 years, while all the constellations become operational.*

### **Perspectives "Data processing"**

*In the profusion of programming software for sensors, gateways, routers and websites, it is difficult to anticipate the emergence of turnkey solutions that are easy to use without extensive computer knowledge. Dependence on experts is likely to last.*

*The development of a universal platform, easy to use, configurable by anyone, with the possibility of data processing of spreadsheet type would be ideal. But this platform must be developed in an open source (free software) way to be enriched by enlightened amateurs around the world, in a manner identical to the ecosystem developed around Linux and the raspberry or arduino.*