



Par le passé, les établissements culturels avaient recours à **des hygromètres ou des hygrographes à cheveu** pour enregistrer les variations de température et d'humidité relative (HR). Peu réactifs aux fluctuations rapides et contraignants à utiliser, ces appareils mécaniques sont aujourd'hui délaissés **au profit de thermohygromètres électroniques enregistreurs** qui permettent des **mesures justes** et qui sont plus **facilement exploitables** pour une étude climatique.

### I/ Composition

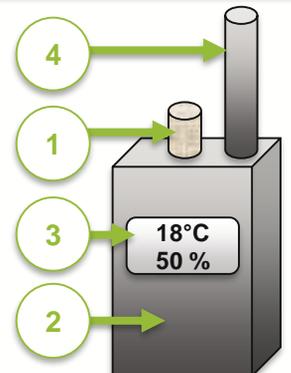
Ces capteurs sont constitués :

1. d'une **sonde en contact avec l'air** ;
  - La sonde est protégée des chocs par un **capuchon perforé**, généralement muni d'un **filtre à poussière**.
  - Cette sonde renferme d'une part une **résistance** en platine sensible à la température et, d'autre part, un **corps hygroscopique** réceptif à l'humidité relative ambiante (polymère hydrophile entre deux électrodes métalliques)\*.
  - Cette partie du capteur rend compte de la valeur climatique. Le corps hygroscopique, chargé en vapeur d'eau, est **traversé par un courant électrique**. La résistance du courant électrique dans le corps humide détermine la valeur qu'affichera et/ou enregistrera le capteur : on parle de **variation d'impédance** pour désigner la circulation du courant électrique au travers du corps hygroscopique.
2. d'un **boîtier** en plastique ;
  - La coque du boîtier se doit d'être plus **étanche** pour les modèles destinés à une installation en extérieur.
  - Le boîtier intègre un **convertisseur** relié à la sonde. Le convertisseur **transcrit les variations électriques** traversant le corps hygroscopique en **signaux numériques**.
  - Pour les modèles enregistreurs, le boîtier contient également un « **data logger** » qui **trie et stocke** les données.
3. d'un **écran d'affichage** (facultatif selon les modèles mais vivement recommandé) ;
  - L'écran d'affichage permet une **lecture directe** des valeurs.
  - Les valeurs de température et d'humidité relative apparaissent sur l'écran soit **par alternance**, soit **simultanément**.
4. et d'une **antenne transmettrice** (modèles à transmission radio) pour l'**envoi des données recueillies** vers un boîtier informatique raccordé à un ou plusieurs ordinateur(s).

Schéma d'un capteur électronique



1. Sonde
2. Boîtier en plastique (étanche si placé en extérieur)
3. Écran d'affichage des valeurs
4. Antenne transmettrice des données par ondes radio



\* Lorsque le corps hygroscopique est un diélectrique de condensateur, on parle de « **sonde capacitive** », tandis que dans le cas où le matériau hygroscopique est une résistance au chlorure de lithium, il s'agit d'une « **sonde résistive** ».

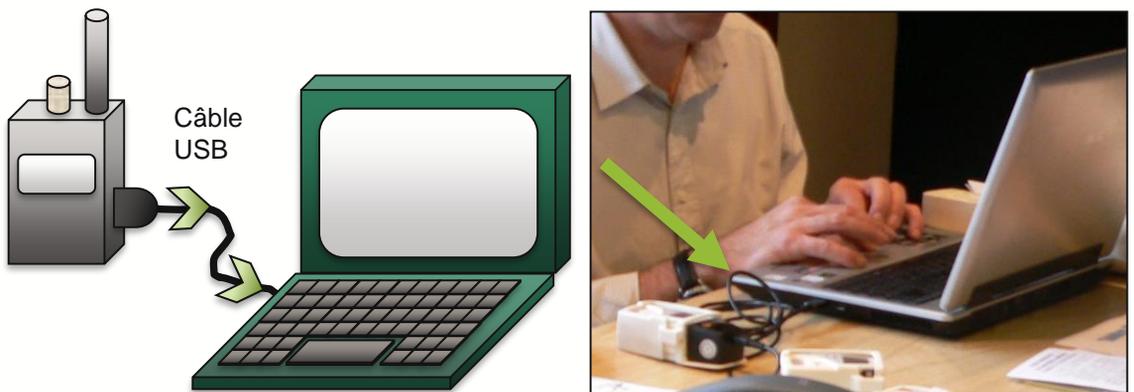
## II/ Modes de transmission et de collecte des données

Pour ce qui a trait à la consultation des données par l'utilisateur, **trois modes de transmission des données** peuvent être principalement recensés pour un capteur électronique enregistreur.

### II.1/ Transmission manuelle des données par contact (capteur enregistreur uniquement)

- Pour télécharger les données collectées par chaque capteur, chacun doit être récupéré en salle et être branché physiquement par un **câble électrique au port USB** de l'ordinateur qui retranscrira les valeurs sous forme de courbes climatiques.
- **Attention** : en cas d'un parc important de capteurs, cette opération s'avère **chronophage et contraignante** (au risque d'être rarement réalisée). En effet, il faut **se rendre physiquement devant chaque capteur** : soit l'institution apporte un ordinateur portable pour connecter chaque capteur individuellement sur place, soit chaque capteur doit être emprunté et acheminé jusqu'à un ordinateur fixe pour collecter les données.

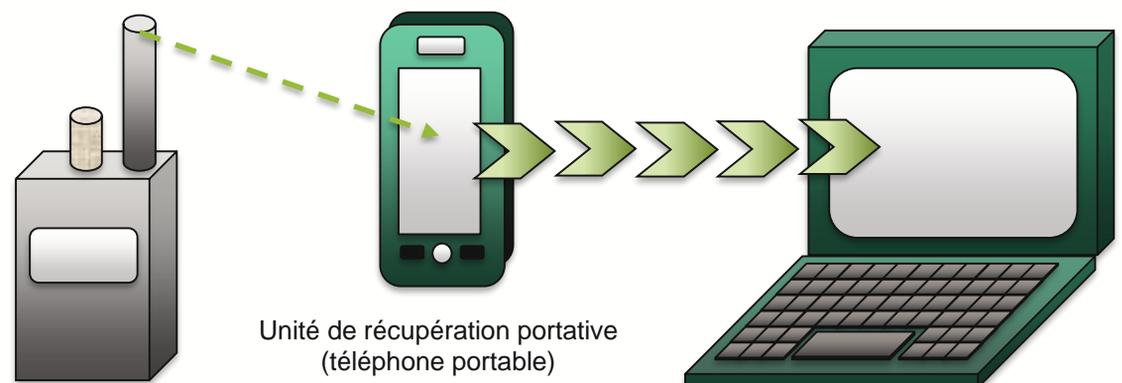
Schéma – Transmission manuelle des données par contact



### II.2/ Transmission manuelle des données par unité de récupération portable – ondes Bluetooth, RFID ou NFC (capteur enregistreur uniquement) [voir Annexe]

- Pour télécharger les données collectées par les capteurs, l'opérateur doit se rapprocher de chacun d'entre eux avec une **unité de récupération portable** des données (généralement un téléphone), cette dernière interceptant les mesures **sans contact avec le capteur**. L'unité de récupération peut se raccorder au Wi-Fi s'il est souhaité de disposer des données sur un serveur.
- **Attention** : en cas de nombreux capteurs, cette opération s'avère **chronophage et contraignante** (au risque d'être rarement réalisée) car il faut **se rendre physiquement devant chaque capteur** et y approcher l'unité de récupération des données.

Schéma – Transmission manuelle des données par unité de récupération portable



## II.3/ Transmission automatique des données par ondes et consultation à distance – ondes basses ou hautes fréquences (capteur enregistreur uniquement) [voir Annexe]

Une transmission de données « sans fil » recourt généralement soit à des ondes de basses fréquences (telles les ondes radio ou les ondes LoRa), soit des ondes de hautes fréquences (comme le Wi-Fi ou les télécommunications 2G à 5G).

	Ondes BF (basses fréquences)	Ondes HF (hautes fréquences)
<b>Portée</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Une grande portée permet au signal de peu faiblir sur la distance et de franchir plus facilement certains obstacles (murs épais pour un accès à l'extérieur ou aux sous-sols, interférences d'autres fréquences radio).</li> <li>Une longue portée réduit le recours à un équipement supplémentaire (tels des répéteurs).</li> </ul>	😊 Longues distances	😞 Courtes distances
<b>Débit</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Un bas débit ne permet pas de transporter d'importantes quantités d'informations.</li> <li>Les données climatiques sont des valeurs alphanumériques, donc peu volumineuses (contrairement aux photos ou vidéos).</li> </ul>	😞 Bas débit... 😊 ... mais suffisant pour des données climatiques	😊 Haut débit
<b>Consommation et longévité</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Un bas débit permet d'être moins énergivore.</li> <li>Une baisse de la consommation d'énergie permet une meilleure longévité des batteries (plusieurs années), ce qui s'avère adapté pour les capteurs difficilement accessibles</li> </ul>	😊 Consommation d'énergie faible (car bas débit)	😞 Consommation d'énergie importante (envoi des données en continue)
<b>Installation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Un système indépendant induit : <ul style="list-style-type: none"> <li>😞 Construction intégrale car ne se raccorde pas à un réseau existant</li> <li>😊 Liberté car ne nécessite pas de système sans fil existant ; système adapté en cas d'absence de Wi-Fi (ou impossibilité de s'y connecter)</li> <li>😊 Interférences inexistantes avec le réseau Wi-Fi (bande passante distincte)</li> </ul> </li> <li>Un système raccordé à un système sans fil existant (Wi-Fi ou autres) induit : <ul style="list-style-type: none"> <li>😊 Économie de mise en place</li> <li>😞 Possibles interférences par la mutualisation de la bande passante</li> <li>😊 Accès aisé aux données enregistrées</li> </ul> </li> </ul>	Système indépendant	Système raccordé au réseau Wi-Fi existant
<b>Fiabilité et maintenance</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Plus la bande passante est mutualisée avec d'autres services, plus le réseau est impacté par des interférences (« embouteillages » d'informations numériques transitant par la même bande).</li> <li>En cas de rupture du signal, la batterie des capteurs se fatiguera en essayant de rétablir la connexion au routeur</li> </ul>	😊 BF moins mutualisées 😊 Peu sujet aux problèmes de connexion 😊 Sollicitation réduite du service informatique	😞 HF souvent mutualisées 😞 Problèmes éventuels de connexion 😞 Implication nécessaire du service informatique

### Notions relatives à Internet et aux réseaux

- « Internet des objets » : la consultation des données en réseau repose sur le principe de l'Internet des Objets « IdO » (ou « IoT » pour Internet of Things en anglais). L'IdO est un réseau de communication par radiofréquence entre plusieurs éléments dits « objets » (dans le cas présent, des capteurs climatiques, des relais d'ondes, des terminaux de consultation tel l'ordinateur) et internet.
- Réseaux « LAN » et « WAN » : un réseau LAN (Local Area Network) correspond à un réseau informatique local d'appareils connectés par voie filaire (Ethernet) ou par radiofréquence (ondes radio, LoRa, Wi-Fi, télécommunication, etc.). Le LAN se distingue du réseau WAN (Wide Area Network) qui est un réseau informatique étendu connectant des ordinateurs distants géographiquement via Internet.

La transmission des données par ondes s'effectue en trois étapes successives.

#### Première étape – Transmission émetteur / concentrateur

- Les données de plusieurs émetteurs – les capteurs électroniques – sont automatiquement envoyées par ondes depuis leur antenne radioélectrique vers une station réceptrice, dite « concentrateur » ou « passerelle » (alimenté sur secteur), dont le rôle est de réunir et de trier les données collectées pouvant provenir de plusieurs dizaines de capteurs (à condition de ne pas être déployés dans des espaces trop éloignés géographiquement).
- Il peut exister des sources de rupture ou d'interférences des informations entre les capteurs et le concentrateur, empêchant ce dernier de recevoir les données. Elles peuvent s'expliquer par une trop longue distance entre les capteurs et le concentrateur ou par les caractéristiques du bâtiment (épaisseur des murs, structures métalliques provoquant un effet « cage de Faraday »). Le fournisseur peut proposer soit d'augmenter le nombre de concentrateurs (chacun se rapprochant physiquement d'une série de capteurs pour réduire les interférences), soit d'installer des relais répéteur d'ondes (alimentés sur secteur ou sur batterie) qui faciliteront la circulation de l'information jusqu'au concentrateur.
- Pour optimiser sa réception des ondes, le concentrateur doit être éloigné de tout élément métallique (sur une périphérie d'une trentaine de centimètres).

#### Deuxième étape – Transmission concentrateur / serveur

Le concentrateur peut verser et stocker les mesures collectées, en temps réel (en continu) ou à intervalles réguliers :

- directement vers un ordinateur unique dédié au contrôle du climat ;
- sur un serveur local (réseau LAN), serveur privé de l'institution auquel plusieurs ordinateurs peuvent se connecter selon les autorisations d'accès accordées par le service informatique. Le logiciel du prestataire devant être installé individuellement sur chaque poste autorisé (selon le nombre de sessions concédées par le prestataire).

Ainsi, plusieurs agents peuvent visualiser les données, soit *in situ*, soit à distance grâce à un accès VPN. Pour un accès à distance au serveur local, le fournisseur peut également proposer une solution de navigation privée (hors internet) : grâce à une plateforme en ligne du fournisseur, celui-ci définit un lien URL conduisant au serveur local de l'institution (l'URL jouant juste un rôle de « raccourci » vers le serveur local) ;

- ou sur un serveur délocalisé (Cloud privé hébergé chez le prestataire) consultable en ligne (Internet), à distance par n'importe quel terminal (aussi bien ordinateur, tablette que smartphone) qui serait autorisé et disposerait des codes d'accès.

Cette solution s'affranchit de toute installation de logiciel puisque l'interface d'exploitation est accessible par un navigateur Web, mais implique un abonnement mensuel de stockage et de consultation des données auprès du prestataire.

Un accès aux données via internet n'est donc rendu obligatoire que si le serveur est hébergé chez le prestataire : la solution du serveur local associé au VPN démontre qu'il est techniquement possible d'accéder à des données privées à distance sans recourir à Internet.

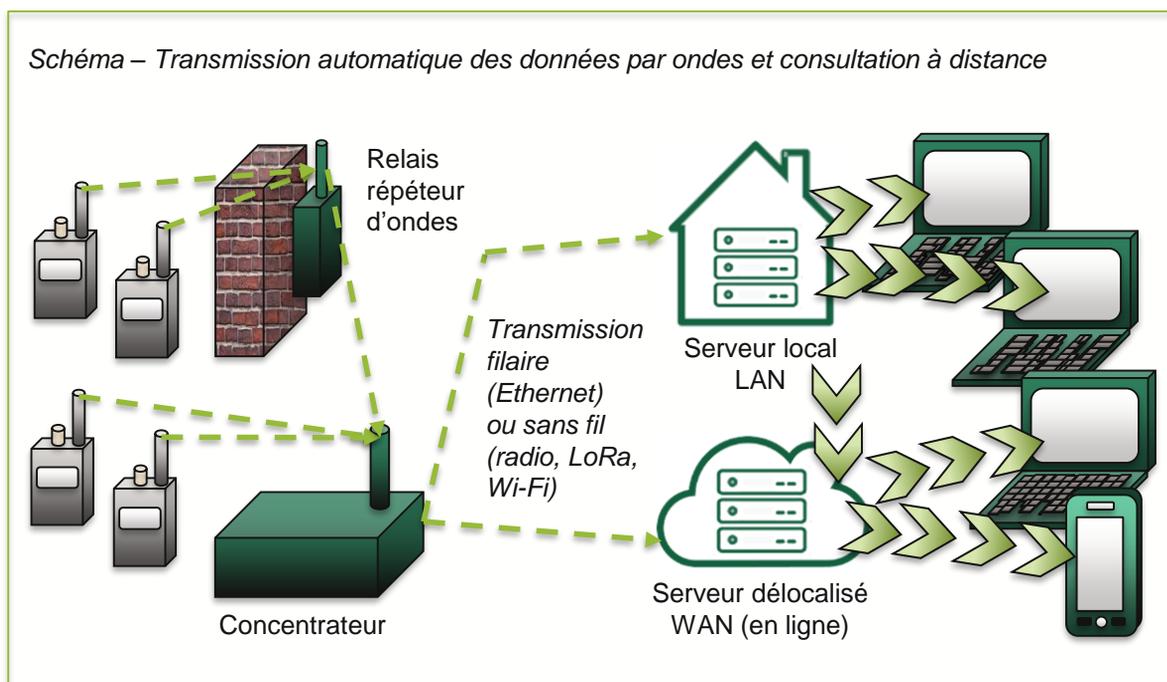
Que le serveur soit privé ou hébergé, chacun doit garantir un **niveau de sécurisation** aux données pour éviter tout piratage.

Ce transfert de données depuis le concentrateur vers le serveur choisi peut s'effectuer par **voie filaire via le réseau informatique** (Ethernet) ou **sans fil via des radiofréquences** (ondes basses fréquences – radio, Lo-Ra – ou hautes fréquences – Wi-Fi, télécommunication 2G / 3G / 4G / 5G, etc.).

### Troisième étape – Transmission serveur / terminal

- Les données sont consultables par le **terminal (ou les terminaux)** qui est (sont) **autorisé(s)** à sonder le serveur local ou délocalisé (internet).
- Dans le cas d'un serveur local s'affranchissant d'une connexion Internet, seul un ordinateur peut consulter les données (*in situ* – par câble Ethernet ou sans fil – ou à distance par le VPN), alors qu'un serveur hébergé permet de visualiser les données sur ordinateur mais aussi sur d'autres types de terminaux comme les tablettes ou les smartphones.
- Plusieurs agents peuvent consulter depuis un terminal les données et les courbes climatiques s'affichant automatiquement, **en direct et sans se déplacer**, leur permettant de **réagir rapidement** en cas d'accident ou de dérive climatique.

Afin de pouvoir communiquer entre eux, le concentrateur ou les relais sont chacun **identifiés par une adresse IP unique**, à définir par le service informatique de l'établissement. Grâce à cette identification, le logiciel installé sur l'ordinateur ou le serveur peut assurer la communication constante et en temps réel entre chaque élément du système : l'ordinateur reconnaissant ces éléments peut réceptionner les données.



L'acquisition de capteurs et de leur système d'exploitation doit être **réfléchi**. Selon leurs performances et leurs fonctionnalités, le suivi des conditions climatiques sera facilité pour l'équipe chargée de la conservation, aguerrie à l'étude des données climatiques.

Le système choisi doit permettre de connaître le climat, d'**accompagner sa surveillance** pour une meilleure réactivité en cas d'incident, de **contrôler l'efficacité des solutions correctives** mises en place (appareils de régulation pouvant être gérés par des sociétés externes) ou d'**affiner les conditions imposées** en cas de prèt.

Rédacteur, schémas et crédit photographique :

Jocelyn Périllat-Mercerot

Relecteurs :

Marie Courselaud,

Juliette Rémy

C2RMF, 2023

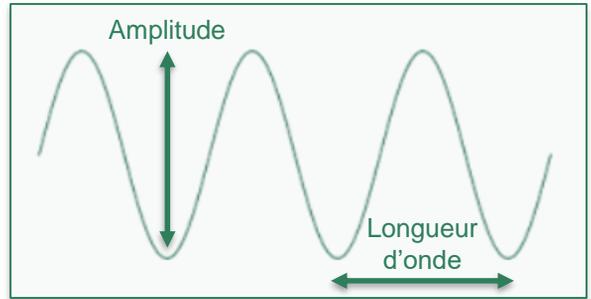


www.c2rmf.fr

## Annexe – Nature des fréquences employées pour un réseau sans fil

- Principe : les ondes électromagnétiques permettent le **transport d'informations** dans l'air. Ce transfert de données est utilisé dans divers domaines : télévision terrestre ou satellite, radio, Wi-Fi, téléphonie mobile, etc.

- Notion de « fréquence » : une onde se caractérise par une **amplitude** (hauteur d'une oscillation) et une **longueur** (distance en mètre entre deux oscillations).



La fréquence correspond au **nombre d'oscillations** que l'onde réalise en une seconde (s'exprimant en Hertz noté Hz). La radiofréquence désigne les ondes électromagnétiques dont la fréquence est située entre 3 kHz et 300 GHz.

- Notion de « bande de fréquences » : il s'agit d'une **plage** pour laquelle les fréquences qui la composent ont toutes les **mêmes propriétés** et ont donc le même domaine d'utilisation.

- Caractéristiques conférées : les bandes de fréquences ont une incidence sur la portée, le débit et la qualité de la transmission des données (voix, images, texte...).

- **Bande passante** (représentative de la quantité de données transmises par unité de temps) : plus la bande est élevée, plus les données à transmettre peuvent être lourdes (images, vidéos, etc.).

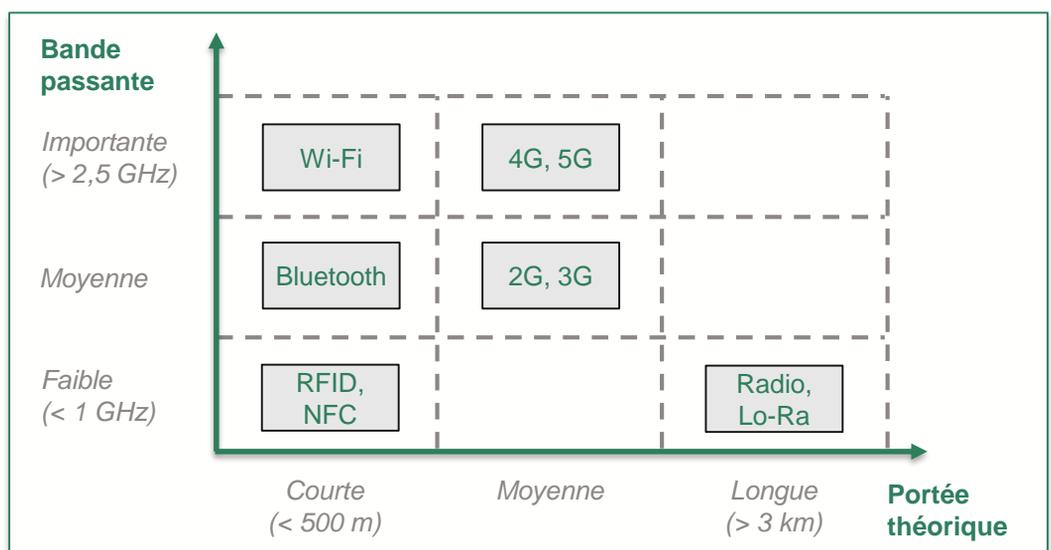
- **Portée des ondes** (distance parcourue par les données) : plus la portée est longue, plus les données peuvent être transmises sur de grandes distances.

- ▲ **Attention** : la portée est corrélée à la bande passante. Plus la fréquence est élevée, plus il y aura d'oscillations, donc plus la longueur d'onde est petite. Or plus la longueur d'onde est faible, moins l'onde est pénétrante : elle pénètre plus difficilement les murs et circule moins loin.

*Par exemple, un Wi-Fi de bande 5 GHz traverse moins les murs qu'un Wi-Fi de bande 2,4 GHz. Un 5G de bande 700 MHz a une portée moyenne de 2 km en zone urbaine alors qu'un 5G de bande 3,5 GHz, a une portée de 400 m.*

- **Débit** (vitesse de transmission des données) : plus le débit est lent, moins les informations s'échangent rapidement en temps réel (lent « bas débit » entre 1 et 3 Mb/s, « haut débit » entre 8 et 30 Mbits/s).

Néanmoins, plus le débit est lent, plus la consommation énergétique est faible (permettant une meilleure durée de vie des batteries des composants du réseau).



Ondes	Domaine d'utilisation	Fréquences	Propriétés
RFID (Radio Frequency Identification)	Identification et localisation d'objets / marchandises	0,9 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bande passante : faible</li> <li>▪ Portée théorique* : courte distance (jusqu'à 100m)</li> </ul>
NFC (Near field communication)	Transfert d'informations	13,56 MHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bande passante : très faible</li> <li>▪ Portée théorique* : très courte distance (jusqu'à 10-20cm)</li> </ul>
GSM (Global System for Mobile Communications) ou GPRS (General Packet Radio Service)	Télécommunication sans fil de 2 <sup>e</sup> génération « 2G » (téléphonie mobile, tablette)	Entre 0,9 GHz et 1,8 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bande passante : moyenne (voix, textes courts SMS)</li> <li>▪ Débit : faible</li> </ul>
UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)	Télécommunication sans fil de 3 <sup>e</sup> génération « 3G » (téléphonie mobile, tablette)	0,9 GHz, 1,9 GHz ou 2,1 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bande passante : moyenne (images, de sons et de vidéos)</li> <li>▪ Débit : rapide</li> </ul>
LTE (Long Term Evolution)	Télécommunication sans fil de 4 <sup>e</sup> génération « 4G » (téléphonie mobile, tablette)	0,7 GHz, ou 2,7 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bande passante : importante (fichiers volumineux, MMS, visiophonie, vidéo)</li> <li>▪ Débit : rapide</li> </ul>
Bluetooth		2,4 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bande passante : moyenne</li> <li>▪ Portée théorique* : courte distance (jusqu'à 60m)</li> </ul>
LoRa (Long Range)	Internet de l'objet (technologie sans fil)	33 MHz, 0,87 GHz ou 0,92 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bande passante : faible</li> <li>▪ Débit : bas</li> <li>▪ Portée théorique* : longue (jusqu'à 5km en zone urbaine)</li> </ul>
Wi-Fi (Wireless Fidelity)	Internet de l'objet (technologie sans fil)	2,4 GHz ou 5 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bande passante : moyenne à importante</li> <li>▪ Débit des données : très rapide</li> <li>▪ Portée théorique* : courte (50m en intérieur, 200m en extérieur, bloquée par les murs épais)</li> </ul>

\* Cette portée officielle est déterminée sans obstacle : dans la réalité, la portée est moindre due à la présence de murs, d'éléments métalliques...