

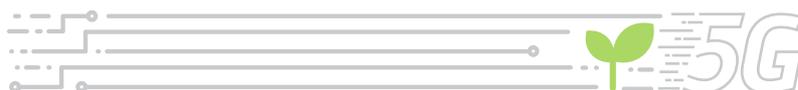


5G ET AGRICULTURE



> DES PROMESSES
AUX USAGES, QUELLES
OPPORTUNITES ?

SOMMAIRE



REMERCIEMENTS	3
---------------------	---

INTRODUCTION.....	4
-------------------	---

» PARTIE 1 | La 5G et ses promesses..... 5

1.1. Des usages et des qualités de services	5
1.2. Un cocktail technologique pour y répondre	8
1.2.1 – La 5G, côté radio.....	9
1.2.2 – La 5G, côté Architecture de réseau	15
1.2.3 – La 5G, vers la convergence des technologies pour l’IoT	17

» PARTIE 2 | Quels usages, quels besoins de connectivité en Agriculture ?..... 20

2.1. On imagine ?	21
2.2. Des besoins actuels aux gains attendus.....	23

» PARTIE 3 | On y croit ou pas ?..... 37

3.1. Accès à internet et (Très) Haut Débit : la 5G arrivera-elle vraiment dans les campagnes ?	37
3.1.1. Aujourd’hui, de vraies inégalités d’accès à l’Internet	37
3.1.2. Avec la 5G, plus haut débit peut-être... mais pas de solution miracle aux zones blanches.....	37
3.1.3. Une situation qui devrait quand même globalement s’améliorer (via la 4G !)	40
3.2. La 5G, c’est pour quand ?	41
3.3. Comment s’y préparer ?	44
3.3.1. Une attente pragmatique des acteurs de l’AgTech.....	44
3.3.2. Poursuivre les efforts de structuration	45

CONCLUSION.....	46
-----------------	----

RÉFÉRENCES.....	47
-----------------	----

REMERCIEMENTS

Merci aux personnes qui ont accepté de répondre à nos questions, même brièvement, dans le cadre de la réalisation de ce dossier :

- > **Colin Chaballier**, Directeur général, Exxact Robotics
- > **Laurent Clavier**, IMT Lille Douai, Univ. Lille, CNRS
- > **Chloé Cochais**, Director of Products, Geosys
- > **Alexis Comar**, CEO, Hiphen
- > **Baptiste Cuny**, Responsable Innovation Services – Service Agronomique, Maisadour / Agralia
- > **Alexandre Diaz**, Responsable Innovation, Isagri
- > **Benoît De Solan**, Ingénieur de Recherche, Arvalis – Institut du végétal
- > **Stéphane Duran**, Responsable de projet, RobAgri
- > **Jérémy Gorget**, Responsable du Service Développement, Vantage Atlantique-Méditerranée
- > **Tristan Guilbot**, Climate Business Manager France, The Climate Corporation
- > **Mathias Herman**, Business Development Manager, Orange Business Service
- > **Barna Keresztes**, Ingénieur de recherche, Laboratoire IMS
- > **Gwenaël Le Lay**, CEO, Copeeks
- > **Corentin Leroux**, Fondateur, Aspexit
- > **Pierre Macé**, Directeur, GIP ATGeRi
- > **Lionel Montchalin**, Strategic Marketing Manager, Naïo technologies
- > **Sébastien Payen**, Fondateur, Fruition Sciences
- > **Bruno Pierrefiche**, Coordinateur Tracteurs et Nouvelles Technologies, CLAAS France
- > **Bruno Tisseyre**, Professeur, l'Institut Agro - Chaire AgroTIC
- > **Christian Thuault**, Responsable Marketing Opérationnel, Orange
- > **Viktor Toldov**, CTO, Lituus

Merci aux courageux relecteurs, notamment :

- > **Guillaume Ferré**, MCF-HDR, Laboratoire IMS, ENSEIRB-MATMECA
- > **Christian Germain**, Professeur, Bordeaux Sciences Agro - Chaire AgroTIC - Laboratoire IMS
- > **François Thiberville**, Enseignant en informatique, Bordeaux Sciences Agro

Ce document est produit dans le cadre des actions de la Chaire AgroTIC, chaire d'entreprises portée par L'Institut Agro (Montpellier SupAgro) et Bordeaux Sciences Agro, associant 28 entreprises et 4 partenaires techniques.

INTRODUCTION



Annoncée de longue date, la 5G, cinquième génération de téléphonie mobile, vient de commencer son déploiement en France.

Présentée comme une révolution technologique pour les particuliers autant que pour l'ensemble des secteurs de l'industrie, la 5G nous promet des bonds spectaculaires de performances en matière de télécommunications mobiles (prise en charge de grands flux de données, échanges instantanés, explosion de l'Internet des objets...) mais aussi de nouveaux usages en rupture avec ce qui existe aujourd'hui.

Parmi les secteurs régulièrement cités dans les nombreux articles et interventions sur le sujet se trouve l'Agriculture :

Comment la 5G va changer la donne pour tous les agriculteurs

COMMENT LA 5G POURRAIT BOOSTER L'AGRICULTURE

(TRIBUNE) L'agriculture a besoin de la 5G !

La 5G, vecteur d'innovations pour le secteur de l'agriculture ?

LOT-ET-GARONNE : ET SI LA 5G AVAIT UN IMPACT POSITIF SUR L'AGRICULTURE

Et si la 5G venait sortir les campagnes de l'isolement

5G : VERS DES MACHINES AGRICOLES TÉLÉGUIDÉES

Il est vrai que les technologies numériques font aujourd'hui partie du quotidien pour bon nombre d'agriculteurs et que la connectivité devient donc un enjeu de compétitivité et une condition pour la transition vers des systèmes de production plus performants et plus durables. Mais on nous parle pêle-mêle de vaches connectées, de champs inondés de capteurs, de tracteurs sans chauffeur, de robots autonomes alors que, dans le même temps, l'accès à internet ne semble pas toujours acquis dans les campagnes. De quoi douter... La 5G, qui a tant fait parler d'elle ces derniers temps, peut-elle réellement être une opportunité pour le secteur agricole ?

La Chaire AgroTIC, qui s'intéresse au développement du numérique au service de l'Agriculture, a donc souhaité faire le point, en croisant différentes sources d'information et en interrogeant différents acteurs du secteur.

>> Nous nous intéresserons d'abord à ce qu'est la 5G, de façon générale : ce qu'elle promet et ce que recouvre ce nouvel ensemble de technologies.

>> Nous essaierons ensuite de réfléchir aux besoins de l'Agriculture en matière de connectivité mobile. Nous nous poserons surtout la question des besoins actuels, des éventuels verrous, et de ce que pourrait apporter la 5G.

>> Enfin, nous essaierons d'évaluer la réalité de la 5G dans notre secteur (et au-delà) à plus ou moins long terme.

PARTIE 1 : LA 5G ET SES PROMESSES

1.1. Des usages et des qualités de services

Comme son nom l'indique, la 5G est la cinquième génération de téléphonie mobile (le «G» signifie «génération») qui succède (et vient s'ajouter) aux autres générations : 2G, 3G, 4G.

Ce que l'on désigne par le terme «génération» correspond en fait à un ensemble de standards établis par les organismes chargés de la normalisation, la réglementation, la planification et l'harmonisation des télécommunications dans le monde. Ces standards situent des **exigences de performances** et sont précisés par des **spécifications techniques**, produites depuis la 3G par le consortium 3GPP (3rd Generation Partnership Project)¹.

Tous les 10 ans environ (le temps de maturation des technologies), une nouvelle génération apparaît et permet d'atteindre de nouvelles performances. La 5G n'est donc pas une surprise (et la 6G est déjà en préparation) ...

Communication analogique	Communication numérique		
	1G	2G	3G
			
Appels vocaux mobiles.	Appels vocaux, messagerie textuelle par SMS (puis messagerie multimédia par MMS).	Appels vocaux, SMS/MMS et applications plus riches en médias (navigation sur l'internet mobile et appels vidéo).	Appels et SMS/MMS, jeux en ligne sur mobile, télévision en direct en haute définition, vidéoconférence de groupe...
Débit de l'ordre de 2,4 Kbits/s	Débit de l'ordre de 9.6 Kbits/s	Débit de l'ordre de 1,9 Mbits/s	4G LTE débit jusqu'à 150 Mbit/s et 4G+ jusqu'à 1 Gbits/s

Figure 1 - Historique des générations de communication mobile

Mais la spécificité de la 5G, par rapport aux générations précédentes, est qu'il ne s'agit pas seulement de faire évoluer les débits mais également **d'intégrer dès le début de la conception une diversité de services, de secteurs d'activité, d'usages et de contraintes** :

- **Diversité de types de services** : la 5G propose des services de connectivité étendus par rapport à la 4G, de l'internet mobile jusqu'à l'IoT (Internet of Things ou, en français, l'Internet des objets), en passant par l'internet fixe. Parce qu'il peut prendre en charge la transmission de tous types de «paquets» de données, un réseau 5G devrait ouvrir la voie à une meilleure interopérabilité entre les systèmes.

¹ 3GPP : Le 3GPP est chargé de produire des spécifications techniques, qui doivent être transposées par les organismes de normalisation compétents (partenaires organisationnels) en produits appropriés (par exemple, des normes). Il associe 7 partenaires de standardisation d'Asie, d'Europe et d'Amérique du Nord mais également des entreprises, des associations et des organismes publics. Source : <https://www.3gpp.org/>

- **Diversité de secteurs d'activités (les «verticales»)** : alors que les générations précédentes s'adressaient de façon générale aux «consommateurs», la 5G a été pensée pour répondre aux besoins spécifiques de différents secteurs économiques, dits les «verticaux» (ou les «verticales»), tels que l'industrie, le transport, le commerce, le divertissement, la santé, les services public, et même...l'agriculture.
- **Diversité d'usages** : en plus des usages classiques liés aux services de voix et de données, la 5G prévoit des applications de rupture comme les véhicules autonomes, la vidéo 360° ou la réalité virtuelle 3D, la réalité augmentée, la robotique industrielle, les services des «villes intelligentes» liés à l'interconnexion d'un grand nombre de capteurs, la maison connectée, ...
- **Diversité de contraintes et de besoins** : accéder à du haut débit dans des zones à forte densité de population, établir des communications en temps réel, compter sur une haute fiabilité (sans rupture de connexion), bénéficier de haut débit en déplacement grande vitesse (dans les trains par exemple), connecter un nombre important de machines et objets, réduire la consommation d'énergie...

Pour caractériser et quantifier ces objectifs, des indicateurs de performance ont été définis dès 2015 par l'Union internationale des télécommunications (UIT). Ils permettent de qualifier le saut de performances attendu entre la 4G (LTE) et la 5G :

	4G	5G
Débit crête (Gbit/s) c'est-à-dire débit maximal par utilisateur. Le débit est la quantité de données transmises dans un temps donné.	1 Gbit/s	20 Gbit/s
Débit moyen perçu par l'utilisateur	10 Mbit/s	100 Mbit/s
Débit sur une zone	0,1 Mbit/s/m ²	10 Mbit/s/m ²
Efficacité spectrale (bit/Hz) (rapport entre le débit et la bande passante)	1x	3x
Vitesse maximale des terminaux	350 km/h	500 km/h
Latence (temps nécessaire pour que des données parviennent à leur destination).	10 ms	1 ms
Nombre d'objets connectés sur une zone	100 000 d'objets/km ²	1 000 000 d'objets/km ²
Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
Fiabilité (pourcentage de transmission correcte d'un paquet de données)	99,9 %	99,999 %

Mais il n'est pas prévu que ces performances maximales puissent toutes être atteintes en tout lieu, à tout moment ou pour tout type d'usage !

Ainsi, 3 grands types de scénarios sont décrits dans les spécifications du 3GPP, chacun privilégiant certains indicateurs au détriment des autres. Leur mise en œuvre est permise grâce à de nouvelles modalités d'architecture et de gestion des réseaux.



Type de cas d'usage 1 : le haut débit mobile amélioré eMBB (enhanced Mobile BroadBand)

L'usage concerné ici est l'usage «classique» associé aux smartphones ou tablettes : mails, conversation en visioconférence, usages de réseaux sociaux, vidéos... Dans ce cadre, ce scénario se focalise plus particulièrement sur la prise en charge du débit de données pour l'utilisateur final. Il doit permettre de résoudre les problématiques de saturation des réseaux face à l'augmentation croissante du volume de données échangées, et d'atteindre des niveaux de services adaptés pour de nouvelles applications telles que la vidéo ultra haute définition, la réalité virtuelle ou la réalité augmentée, mais également pour l'accès Internet sans fil fixe au domicile... Le grand public (urbain) est la première cible visée.

Type de cas d'usage 2 : la faible latence et la haute disponibilité uRLLC (ultra-Reliable Low Latence Communications)



On cherche là à atteindre les performances maximales en termes de faible latence (de l'ordre de la milliseconde, autrement dit, du «temps réel»), de fiabilité du réseau (opérationnalité effective du réseau et capacité à fonctionner sans interruption) et de mobilité (capacité à bénéficier d'un accès au réseau en mouvement).

Il couvre, par exemple, les exigences des secteurs de la santé (suivi de patient ou de matériel, soins à distance, des besoins de téléchargement d'images jusqu'à la télé-chirurgie), de la sécurité publique (situations critiques exigeant des priorités d'accès), de l'énergie (notamment des «smart-grids» qui permettent de réguler les flux en fonction des besoins réels), de l'industrie (automatisation et robotisation sans fil, maintenance prédictive, systèmes de contrôles) (2) ou de l'industrie automobile (voitures autonomes et connectées, technologies dites «V2X» : Vehicule-to-everything)...



Type de cas d'usage 3 : communications massives de type machine (IoT massif) mMTC (massive Machine-Type Communications)

Il s'agit de se concentrer sur la capacité, du point de vue de l'opérateur, à assurer la connectivité d'un grand nombre de terminaux (d'objets) en même temps, entre les antennes et les objets mais également entre les objets eux-mêmes (communications machine à machine). L'efficacité énergétique est également un critère clé pour ce scénario car la promesse est de fournir de l'IoT basse consommation.

Il s'agit par exemple de couvrir les besoins des «villes intelligentes» où l'utilisation d'un grand nombre de capteurs est prévue pour optimiser la gestion de l'éclairage, des déchets, de la circulation et des stationnements... L'agriculture est également largement visée.

Une adaptation aux spécificités de ces usages permise par le découpage du réseau en «tranches» Network Slicing



Ces différents scénarios de besoins appellent différentes configurations des réseaux, différentes façons d'articuler les ressources. Aujourd'hui, pour y répondre, il est nécessaire de recourir à des types de réseaux de communication distincts (WiFi, LoRa, 2G, 4G...), souvent en faisant des compromis. La 5G prévoit d'unifier la proposition de services et de l'adapter spécifiquement aux besoins.

**La 5G est donc conçue pour répondre à une multitude de besoins.
Et pour permettre cela, un véritable cocktail technologique va être proposé !
Essays d'en comprendre les principaux ingrédients...**

1.2. Un cocktail technologique pour y répondre

La 5G n'est pas UNE technologie. C'est un regroupement de technologies. Avant d'aller plus loin sur la composition du cocktail, rappelons quelques bases sur les architectures de réseaux mobiles. Très schématiquement, un réseau mobile est constitué de 2 parties :

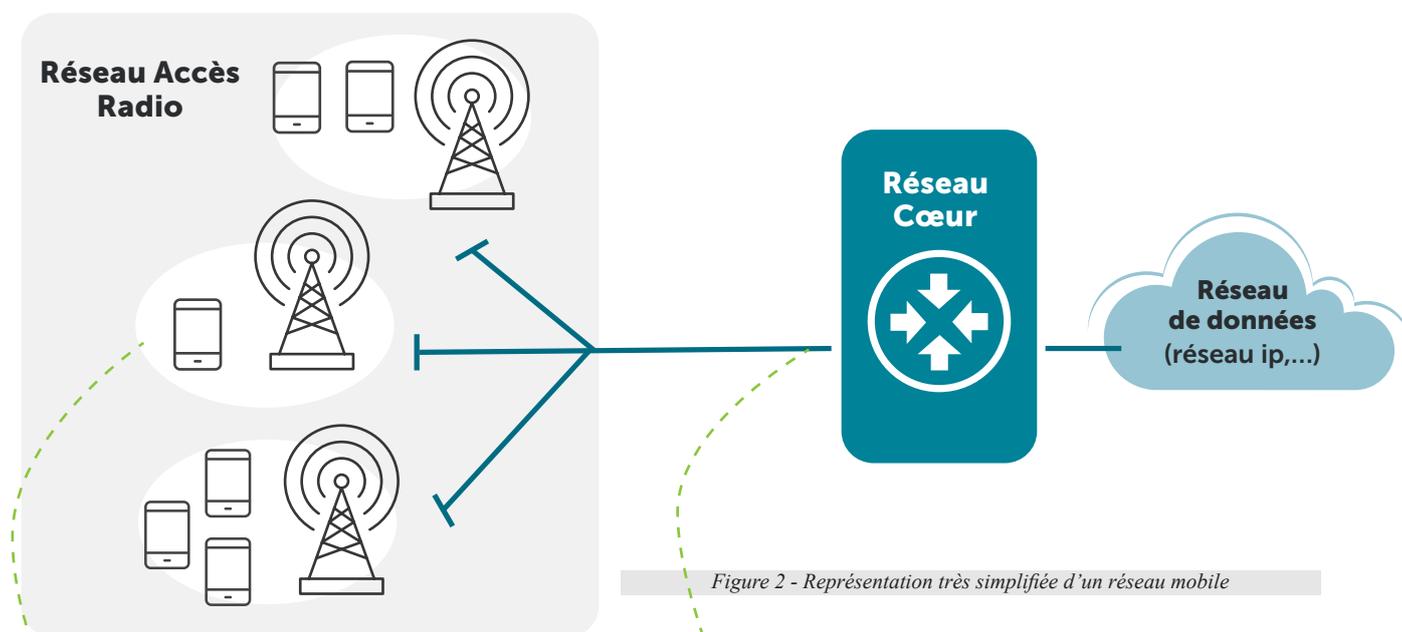


Figure 2 - Représentation très simplifiée d'un réseau mobile

UN RÉSEAU D'ACCÈS RADIOÉLECTRIQUE

C'est l'interface permettant de **connecter les différents terminaux (smartphones, objets connectés, ...) au cœur de réseau** grâce à des ondes radio propagées selon des fréquences allouées. Un réseau d'accès est constitué des équipements permettant d'émettre et recevoir les signaux : les stations de base (auxquelles sont rattachées les antennes). La nouvelle partie «radio» de la 5G est appelée 5G NR (New Radio)

UN CŒUR DE RÉSEAU (OU RÉSEAU CŒUR)

C'est la partie centrale qui assure toutes les **fonctions de transport et de commandes** nécessaires pour fournir les services : les méthodes pour définir les circuits au sein du réseau, pour segmenter les données en différents paquets par exemple... Il assure la passerelle avec les autres réseaux. On utilise le sigle de 5GC (5G Core Network) pour désigner cette partie.

Les nouveautés ou améliorations amenées par la 5G (à terme) se situent à la fois côté «Radio» :

- **nouvelles gammes de fréquences,**
- **nouvelles techniques de transmission,**
- **nouvelles antennes**

et côté «cœur de réseau» ou, plus largement «architecture du réseau», en lien avec l'utilisation accrue des technologies de **virtualisation des réseaux.**



» 1.2.1 | LA 5G, CÔTÉ RADIO

>> UNE GAMME DES FRÉQUENCES ÉLARGIE

L'augmentation du trafic de données sur les réseaux mobiles a été rapide ces dernières années. Entre 2015 et 2019, la consommation de données mobiles a été multipliée par 10, comme l'indiquait l'Arcep (Autorité de régulation des communications électroniques et des Postes) dans son rapport d'Observatoire des marchés des communications électroniques en juin 2020 (3) :

Traffics de données consommées sur les réseaux mobiles (en Exaoctets)						
	2015	2016	2017	2018	2019p	Evol.
Abonnements et forfaits	0,523	0,993	2,177	3,594	5,134	42,8%
Cartes prépayées	0,009	0,015	0,026	0,051	0,131	156,5%
Consommation de données au cours de l'année	0,532	1,008	2,203	3,646	5,266	44,4%
dont consommées par les cartes internet exclusives	0,030	0,050	0,056	0,079	0,115	46,7%
dont consommées par les clients actifs 4G	0,345	0,856	2,029	3,386	4,940	45,9%

Figure 3 - évolution des trafics de données sur les réseaux mobiles. Résultats provisoires 2019. Source : Arcep, juin 2020 (3)

Il en résulte des réseaux sous «pression», en particulier dans les zones urbaines à forte densité de population, qui pourraient être saturés d'ici 2022 d'après Nicolas Guérin, président de la Fédération française des télécoms (4). **Pour faire passer plus de débit, élargir la bande passante devient nécessaire ; c'est ce qui motive l'ouverture de nouvelles gammes de fréquences.**

En France, la 5G va principalement reposer sur 3 gammes de fréquences «pionnières» :

700 MHz	3,4-3,8 GHz	26 GHz
Ces fréquences ont été graduellement mises à disposition des opérateurs mobiles d'avril 2016 à juin 2019 (5) et sont actuellement utilisées pour la 4G. Elles sont déjà également utilisables pour la 5G (le spectre disponible peut varier selon les opérateurs).	Cette gamme correspond à celle qui a été attribuée aux opérateurs français fin septembre 2020. Elle devrait constituer la bande-cœur de la 5G. On l'appelle également la bande 3,5 GHz. En France, les premiers déploiements privilégient cette gamme.	Les fréquences «millimétriques» ou «mmWave». C'est la vraie nouveauté de la 5G (et donc celle qui crée la polémique...). Cette gamme de fréquences n'a pas encore été attribuée aux opérateurs français, sauf dans le cadre de tests et pour une durée limitée. Elle devrait être attribuée d'ici 2022 ou 2023.

Les fréquences déjà utilisées par les autres générations pourront également être utilisées pour la 5G : 800 Mhz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz. Ainsi, Bouygues Telecom, Orange et SFR vont s'appuyer sur la bande 2,1 GHz et Free Mobile sur la bande 700 MHz pour accompagner leur déploiement 5G.

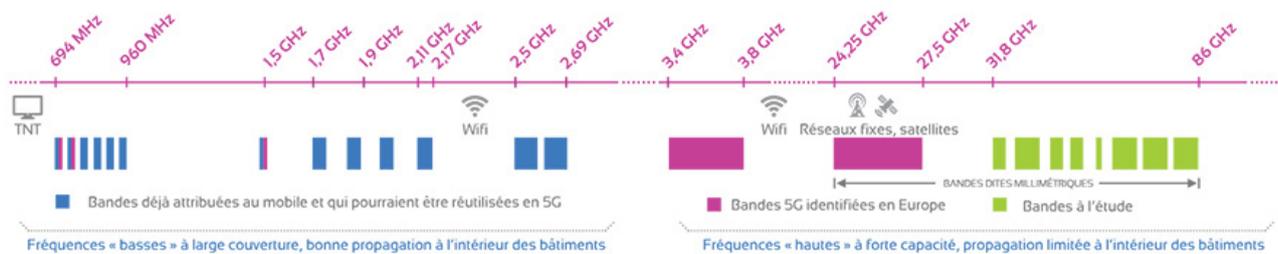


Figure 4- les fréquences attribuées aux réseaux mobiles. Source : ANFR (6)

Pour rappel, plus la fréquence est haute, plus la longueur d'onde est courte, plus la portée est faible et plus le débit est important. **Chaque gamme offre donc des possibilités techniques différentes.** On distingue habituellement le groupe des fréquences Sub-6 (<6 GHz) du groupe des ondes millimétriques en raison de ces différences de propriétés.

Des propriétés différentes pour chaque gamme de fréquences

Pénétration à l'intérieur	Portée	Débit
★★★★	★★★★	★

Les **fréquences inférieures à 1Ghz** permettent une couverture de larges zones. Elles peuvent être adaptées en zone rurale par exemple, en permettant une bonne couverture du territoire, avec peu d'antennes. Cette gamme a une bonne pénétration dans les bâtiments. Cependant, les performances en termes de débit sont moindres. La gamme 700 MHz n'est pas compatible avec une des nouvelles technologies de la 5G, le beamforming, que nous verrons un peu après. Ces gammes peuvent offrir des propriétés intéressantes pour l'IoT, avec des gains en latence.

Pénétration à l'intérieur	Portée	Débit
★★	★★★★	★★★★

Les fréquences de **3,4 à 3,8 Ghz** proposent un bon compromis entre la portée, le débit et la fiabilité.

Pénétration à l'intérieur	Portée	Débit
★	★	★★★★★

Les fréquences de la **bande 26 GHz (ondes millimétriques)** ouvrent de larges gammes de spectre inexplorées, ce qui, couplé aux nouvelles techniques de transmission et aux nouveaux types d'antennes, devrait permettre d'assurer de très hautes performances de débit. Elles pourront être adaptées pour assurer des services pour une forte concentration de population ou à très fort besoin de débit (services de réalité augmentée par exemple). Mais ces ondes ont une faible couverture et peuvent vite être bloquées par des obstacles (murs, feuillages...) ou perturbées par les conditions climatiques (pluie, absorption par l'atmosphère...). Alors que leur usage sera d'abord urbain, cet environnement plein d'obstacles ne leur sera pas directement favorable. Pour pallier ce problème et éviter les coupures de connexion, il sera nécessaire d'installer de nouvelles antennes plus rapprochées, de petite taille (les micro-antennes ou micro cells), permettant de faire le lien entre elles et avec les antennes macro (les macro cells).

Plus de débit grâce à des bandes de fréquences plus larges

Le fait d'accéder à de nouvelles gammes de fréquences, jusque-là peu ou pas utilisées, permet de disposer **de plus grandes largeurs de bandes**. Par exemple, la gamme de fréquence de 3,4-3,8 Ghz sera « découpée » en bandes de 50 et 100 Mhz de large, ce qui est supérieur aux largeurs de bandes disponibles sur les autres générations. Pour les ondes millimétriques, les largeurs de bande pourront atteindre 400 MHz. Pour schématiser, les « canalisations » pour faire passer les données seront donc de plus grande taille. C'est ce qui va permettre les gains énormes en matière de débit. En revanche, qui dit nouvelles fréquences dit terminaux capables de prendre en charge ces nouvelles fréquences et donc, dans de nombreux cas, un nécessaire renouvellement des objets...

POUR RÉSUMER :

- > Les fréquences inférieures à 1 GHz seront plutôt destinées à assurer la couverture (larges territoires, en intérieur ou en accès difficile). Elles pourront être utilisées pour l'IoT massif (via LTE-M et NB-IoT, voir partie 1.2.3)
- > La gamme des 3,5 GHz adressera des usages mixtes nécessitant un bon équilibre en débit et latence pour une haute fiabilité (usage industriels, scénario uRLLC)
- > La gamme des ondes millimétriques est celle de l'Ultra Haut Débit (eMBB)

>> DES TECHNIQUES DE TRANSMISSION OPTIMISÉES

Plus de données à transmettre et un spectre élargi, c'est encore plus d'ondes qui vont se croiser. Les techniques de transmission utilisées ont donc un rôle crucial. Il s'agit de techniques de **codage** du signal et de méthodes permettant de gérer efficacement le partage des ressources temps/fréquence. On peut par exemple jouer sur la transmission sur une même bande de fréquences à des instants différents (multiplexage temporel), ou sur plusieurs bandes de fréquences en même temps (multiplexage fréquentiel).

En réalité, les techniques mobilisées dans la 5G sont très proches de celles disponibles en 4G LTE mais elles bénéficient d'une maturité supérieure et de paramétrages optimisés permettant notamment une plus grande flexibilité et une plus grande efficacité dans l'utilisation du spectre de fréquences (6).

Retenons en particulier :

Une gestion plus flexible des communications montantes et descendantes

Dans le cadre des communications mobiles, deux types de liaisons peuvent être considérées : la **liaison montante**, entre le terminal de l'utilisateur et la station de base, et la **liaison descendante**, de la station vers le terminal. La gestion de ce mode de communication bidirectionnel est le «**duplexage**».

Jusqu'à la 4G, c'est le mode de duplexage **FDD (Frequency Division Duplex)** qui était principalement utilisé (et même exclusivement utilisé en France) : une bande de fréquences est dédiée au lien descendant et une autre au lien montant. Or, dans les réseaux mobiles actuels, le trafic entre les 2 sens de liaison est souvent asymétrique car les utilisateurs téléchargent plus qu'ils n'envoient de données. Mais, à l'avenir, des applications sur la liaison montante pourraient s'intensifier (par exemple, le stockage de données dans le cloud). **Il devient donc nécessaire de gagner en souplesse dans l'utilisation du spectre (7).** Pour cela, une autre forme de duplexage sera privilégiée en 5G : le **TDD (« Time Division Duplex »)**.

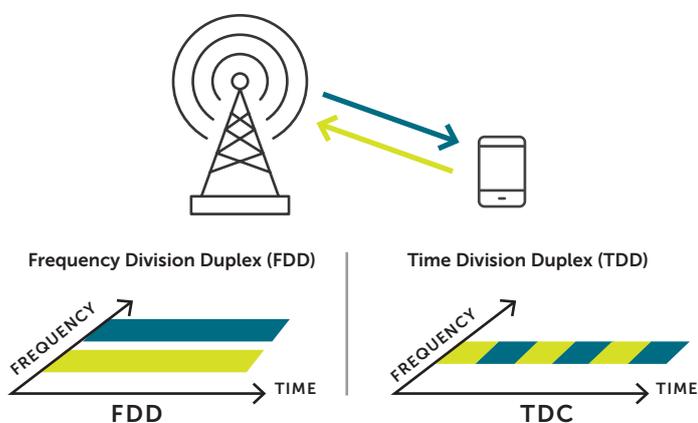


Figure 5 - Principe FDD et TDD

Dans ce système, les communications en liaison montante ou descendante utilisent la même bande de fréquences mais à des moments différents. Lorsque le débit d'émission augmente ou diminue, la durée des transmissions est adaptée et on peut ainsi allouer plus ou moins de bande passante.

En France, le TDD sera utilisé sur les nouvelles bandes de fréquences de la 5G (bandes 3,4-3,8 et plus tard 26 GHz) mais le FDD restera utilisé sur les fréquences «historiques» pour lesquelles il est plus adapté. **Le TDD permet d'utiliser les technologies «MIMO Massif»** (que nous verrons ultérieurement).

Une meilleure gestion multi-utilisateurs

La 5G reprend le principe de base de codage OFDM (**Orthogonal Frequency Division Multiplexing**) déjà éprouvé en LTE mais cette fois aussi bien dans la communication montante que descendante. Ce format de codage, compatible avec le TDD et le FDD, est extrêmement performant du point de vue efficacité spectrale et fiabilité.

L'OFDM consiste à transmettre une information (une suite de bits, ou «symboles») sur un grand nombre de sous-canaux différents, c'est-à-dire sur des fréquences différentes. (8) On parle de fréquences «porteuses», elles-mêmes subdivisées en «sous-porteuses». Le signal est ainsi découpé en de multiples morceaux, chacun correspondant à un très faible débit de données. Les sous-porteuses utilisent des fréquences les plus proches

possibles pour **utiliser au maximum la bande passante**. La transmission est cependant dite «orthogonale» car, bien que très proches (ou se chevauchant), les sous-porteuses sont espacées de telle sorte qu'elles n'interfèrent pas entre elles.

La 5G (comme la 4G) retient un dérivé de ce système qui optimise la gestion du partage de la bande passante entre les utilisateurs, notamment lors des communications descendantes : **l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)**.

En OFDM «classique», l'accès pour plusieurs utilisateurs est géré par un multiplexage temporel : les utilisateurs utilisent une même bande de fréquences mais à des moments différents.

L'OFDMA permet de combiner le multiplexage temporel et de fréquences. Si un utilisateur n'a pas besoin de toutes les sous-porteuses en même temps, la ressource est partagée avec d'autres utilisateurs. Ce système permet donc de servir plus de terminaux en réduisant globalement la latence. Il permet en outre une attribution des meilleurs canaux disponibles, en adaptant la puissance nécessaire.(9)

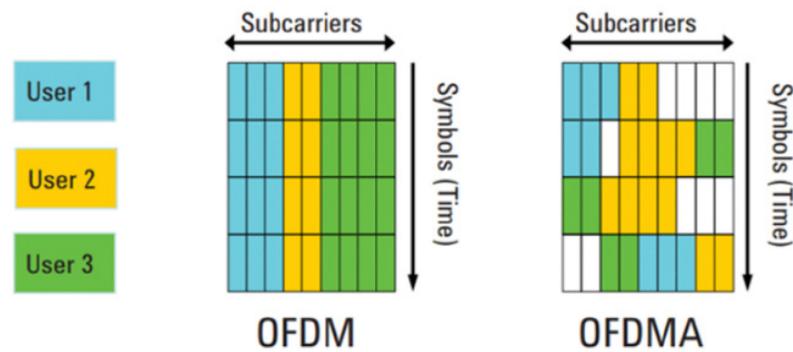


Figure 6 - Différence de gestion multi accès entre OFDM et OFDMA
(Crédits : @Ahmed Roumane)

En revanche, de fait, l'OFDMA² peut entraîner de fortes variations au niveau de la puissance à déployer, ce qui peut être gênant, notamment en liaison montante. Un terminal, qui fonctionne sur batterie, exige des conditions de fonctionnement relativement stables. Aussi, dans certains cas et notamment en liaison montante, le réseau 5G pourra proposer plusieurs formes de multiplexage, à une seule porteuse, en fonction des conditions.

Une modulation adaptative en fonction des conditions

C'est finalement cette capacité d'adaptation accrue qui est un élément clé de la 5G NR par rapport au 4G LTE. Le principe de codage, où chaque petit bout de signal est véhiculé de façon quasi indépendante, autorise une grande flexibilité.

En 5G, en théorie, des modulations de porteuses extrêmement performantes en termes de débit peuvent être mises en œuvre. Mais dans la réalité, il est nécessaire de s'adapter aux conditions et à la qualité du signal d'origine. Si besoin, une modulation moins performante en débit mais plus efficace en termes de fiabilité ou de latence doit pouvoir être retenue. Cette flexibilité sera permise avec la 5G.

Par rapport au système LTE qui, sur la base du même type de technologies, proposait un cadre fixe en termes de codage du signal, la 5G NR propose des canaux de différentes tailles, un espacement de sous-porteuses et une longueur de créneau variables, adaptées aux types de fréquence, et beaucoup plus de sous-porteuses en utilisation simultanée par canal (jusqu'à 3300). (10) **C'est cette flexibilité qui, à terme, doit permettre de gagner en débit, mais également de réduire la latence pour une grande hétérogénéité de dispositifs connectés.**



² De façon générale, OFDM et OFDMA sont synonymes de mauvaise efficacité énergétique, car la puissance consommée n'est que partiellement convertie en ondes électromagnétiques.

>> DE NOUVELLES TECHNOLOGIES D'ANTENNES

Ces nouvelles techniques de transmission, permettant d'émettre et recevoir en même temps et de gérer l'accès synchrone de très nombreux utilisateurs, vont être prises en charge par une nouvelle technologie d'antennes : **les antennes MIMO, et plus particulièrement « MIMO massif »**.

MIMO massif

MIMO est l'abréviation de Multiple Input, Multiple Output (en français, Entrées multiples, Sortie multiples). Les réseaux **MIMO** ne sont pas nouveaux et sont déjà utilisés en 4G LTE. Il s'agit d'une technologie consistant à multiplier les signaux pour transmettre une même information, en utilisant plusieurs antennes tant du côté «émetteur» que du côté «récepteur». Elle permet de résoudre le problème de la perturbation des trajectoires des ondes (engendrant une perte de débit), rencontré dans les systèmes plus classiques où il n'y a qu'une antenne en émission et une antenne en réception et où émission et réception doivent se relayer dans le temps et/ou utiliser des fréquences différentes. En l'occurrence, l'utilisation de cette nouvelle technologie d'antennes en 5G va permettre de compenser les problèmes de propagation rencontrés pour les fréquences les plus élevées (bande à 3,5 GHz et ondes millimétriques).

La technologie MIMO permet d'équiper une même station de base avec un nombre élevé de micro-antennes. En 4G, on rencontre une douzaine de micro-antennes par station. Avec la 5G, et le besoin d'assurer des connexions avec un nombre plus important de petites cellules et de terminaux, c'est une nouvelle étape qui doit être franchie au travers du **MIMO massif**, lequel permet de concentrer plus de 128 micro-antennes par station (et probablement bientôt beaucoup plus). Cette technologie permet d'augmenter les débits en utilisant les différentes techniques de multiplexage évoquées plus haut. Mais elle présente également une autre caractéristique intéressante : **le beamforming** (ou formation de faisceau).

Beamforming

Habituellement, les antennes radio diffusent les signaux dans toutes les directions (elles «arrosent» toute la zone). La technique du beamforming consiste, elle, à focaliser un signal dans une direction donnée. Pour cela, le même signal est envoyé par plusieurs antennes à proximité les unes des autres (d'où l'association avec la technologie MIMO). Des algorithmes font en sorte que les interférences entre les ondes qui se chevauchent puissent être utilisées de façon constructive pour rendre le signal plus fort : il est concentré sous forme d'un faisceau. Cette concentration permet d'augmenter la puissance utile au récepteur sans augmenter la puissance totale consommée. 1) l'antenne effectue une analyse séquentielle, à très haute vitesse, à très faible émission 2) Si un terminal 5G est identifié, **seul le terminal qui a besoin du signal reçoit le signal, et non tout ce qu'il y a autour de lui, et c'est seulement pendant le temps de la communication que le faisceau est activé**. Cela marche également lorsque l'utilisateur est en mouvement.

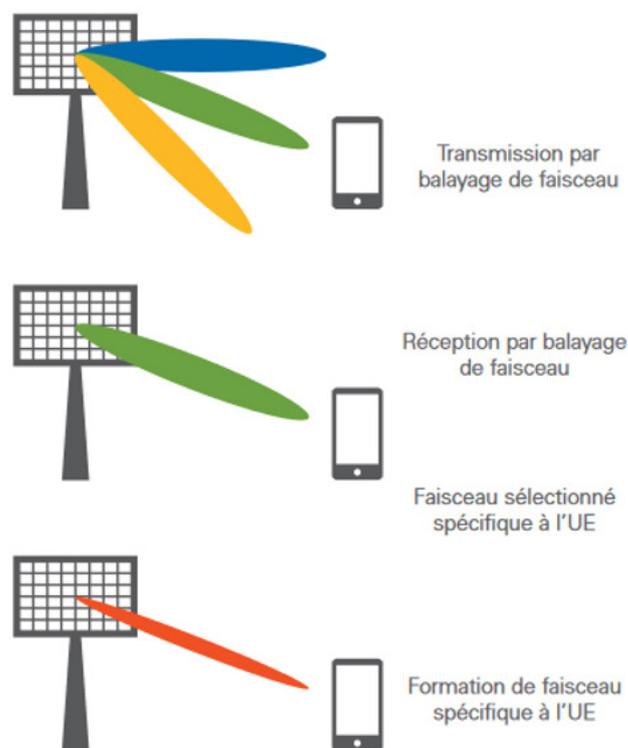


Figure 7 - Accès au terminal par un 1er faisceau de signalisation puis formation du faisceau dédié à l'UE (User Equipment).
Source : National Instruments.

Les antennes 5G sont caractérisées par le fait de pouvoir diriger le faisceau dans différentes directions (y compris au-dessus d'elles) du fait de toutes les micro-antennes qui les composent. Leur rayonnement est variable dans chaque direction. Elles sont ainsi dites «actives», par opposition aux anciennes antennes «passives» qui produisent un faisceau fixe dans une seule direction.

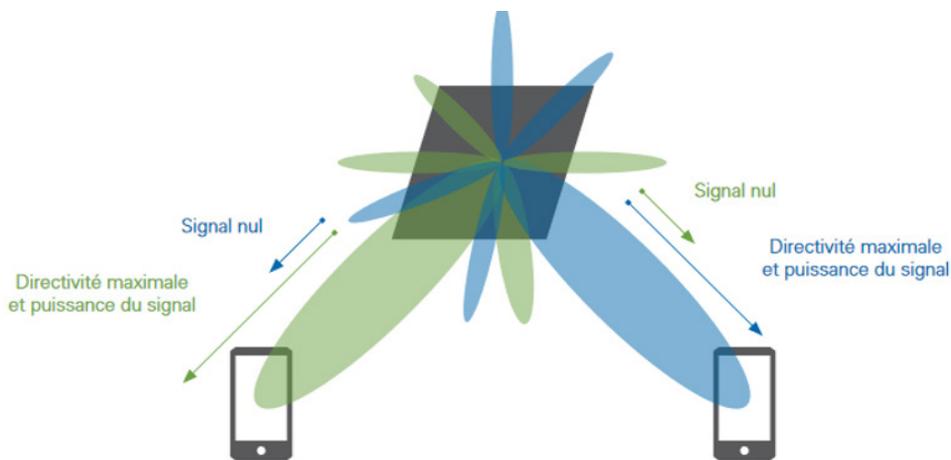


Figure 8 - Formation de faisceaux MIMO.
Source : National Instruments (10)

Même si la puissance calculatoire nécessaire pour faire tourner les algorithmes de formation de faisceau est grande, les opérateurs promettent une diminution de la consommation d'énergie (à volume de données constant) grâce à ce système du fait que :

- Les antennes n'émettent que lorsque l'utilisateur en a besoin
- Le terminal de l'utilisateur reçoit le signal maximum adapté à son besoin, sans avoir à rechercher en continu le meilleur signal disponible. (Voir figures 7 et 8).

Attention, le beamforming n'est pas compatible avec toutes les gammes de fréquences. Il s'adresse aux fréquences «hautes» (à partir de la bande 3,5 GHz).

Une infrastructure du réseau radio modifiée

Du fait de tout ce que nous venons de voir, l'infrastructure générale du réseau d'accès radio 5G devrait évoluer vers une configuration différente de ce que l'on connaît actuellement, où les réseaux d'accès sont essentiellement constitués d'antennes dites «macro» (les stations de base). Il devrait ainsi évoluer vers une infrastructure combinant :

- **Des antennes macro utilisant les fréquences «classiques»** permettant de gérer des services de voix et de données sur de grandes distances, mais à débit plus réduit que les «nouvelles» antennes,
- Des nouvelles antennes macro 5G constituées d'un regroupement de micro-antennes (MIMO massif), permettant d'assurer du haut débit pour un grand nombre d'utilisateurs (**donc à proximité des centres urbains ou de forte activité industrielle**).

A terme, leur nombre pourrait être plus important que les antennes macro actuelles mais les opérateurs insistent sur le fait que, dans un premier temps, ces antennes seront déployées en priorité sur des sites existants (donc souvent pour des zones déjà desservies par la 4G).

- Des **antennes de portée intermédiaire**, des micro-antennes permettant de desservir des zones réduites (d'une dizaine à une centaine de mètres). En ville, des micro-antennes pourraient par exemple être intégrées dans des mobiliers urbains. Cependant, l'Arcep indique que «les conditions réglementaires d'installation de ces antennes sont encore à préciser».

Les liaisons entre sites et entre les antennes et le réseau cœur continueront à être assurées par différents dispositifs : câbles cuivre classiques, faisceaux hertziens mais aussi et surtout fibre optique, permettant d'assurer une vitesse de transmission satisfaisante (notons d'ailleurs que le développement de la 5G est donc, par certains aspects liés à celui de la fibre).

Remarque : dans un premier temps (voire pour un temps durable), cette nouvelle configuration vaudra essentiellement pour les zones où la population est suffisamment dense (zones urbaines ou péri-urbaines) ... Nous y reviendrons dans la partie 3.1.

» 1.2.2 | LA 5G, CÔTÉ ARCHITECTURE DE RÉSEAU

Du côté architecture des réseaux, les grandes innovations promises par la 5G seront liées à de nouvelles possibilités de virtualisation des réseaux. C'est en effet la mise en œuvre de ces technologies qui doit permettre d'adapter les services de connectivité aux besoins, multiples et souvent divergents, dans une approche de «Network slicing» (découpage en tranches du réseau, en fonction de performances à atteindre).

»» UNE ARCHITECTURE BASÉE SUR LA VIRTUALISATION...

La multiplication des types de réseaux et l'extension des bandes de fréquences utilisées complexifient la gestion des infrastructures de réseau. Une simplification de cette administration est donc recherchée. En 5G, celle-ci va passer par 2 concepts-clés (déjà largement utilisés dans le monde des systèmes d'information) :

- La technologie **Network Function Virtualization (NFV)** qui correspond à la séparation des infrastructures matérielles (hardware) et des applications ou fonctions logicielles (software). Elle permet de se passer d'un équipement spécialisé pour prendre en charge certaines fonctions telles que les contrôles d'accès, les routeurs, etc. Les logiciels pourront être utilisés sur des équipements banalisés, sur un principe de machines virtuelles et d'un mode « cloud ».
- La technologie **Software Defined Networking (SDN)** qui permet de programmer le «comportement du réseau de manière contrôlée et centralisée grâce à des applications logicielles utilisant des interfaces de programmation (API)»(11).

Concrètement, un cœur de réseau doit assurer différentes fonctions (12):

- une fonction de **routing** consistant à activer des algorithmes pour calculer et sélectionner les chemins optimaux par lesquels le trafic des paquets de données peut être assuré entre les différents nœuds du réseau ;
- une fonction de **transport** qui correspond à la mise en œuvre de l'acheminement des paquets de données selon les chemins sélectionnés.

Dans un réseau classique, ces deux fonctions sont assurées par une série de routeurs physiquement distribués sur le réseau. Les règles de routage sont définies à l'avance et peu modifiables.

»» Grâce à la technologie SDN, il est possible d'isoler la partie «contrôle» (c'est-à-dire la partie «intelligence») de la partie transport des données : la commande des équipements peut être centralisée et permettre une adaptation plus fine des décisions de routage, en fonction des besoins.

»» Grâce à la technologie NFV, la gestion du réseau peut en plus s'affranchir des différentes technologies et matériels impliqués donc gagner en flexibilité et en interopérabilité. Les ressources physiques peuvent ainsi être exploitées, au besoin, par d'autres opérateurs.

Pour les opérateurs, ce nouveau mode de gestion est synonyme de diminution des coûts d'infrastructure et de nouveaux modèles économiques (proposition de services sur mesure ou à la demande).

>> ...QUI PERMET LE «NETWORK SLICING»

En 5G, la virtualisation des réseaux se traduit notamment par la capacité à **découper le réseau en tranches** (ou « slices ») : pour répondre aux différents cas d'usage et/ou aux besoins spécifiques des utilisateurs, les opérateurs vont pouvoir définir des réseaux virtuels fonctionnant sur la base d'une même infrastructure physique. Chaque tranche sera « *une collection de ressources, [fonctions logicielles et infrastructures matérielles], qui combinées ensemble de manière appropriée, permettent de créer un support réseau répondant aux exigences demandées* » (13), comme le montre la figure ci-après.

Les opérateurs pourront délivrer et s'engager sur des niveaux de performances différents :

- en s'adaptant aux besoins spécifiques d'une verticale (secteur d'activité) ou bien aux besoins d'un usage donné (type d'utilisateur, type de terminal, type d'application)
- en adaptant le type de réponse : adaptation aux besoins en temps réel, de façon dynamique, ou proposition de slices fixes.

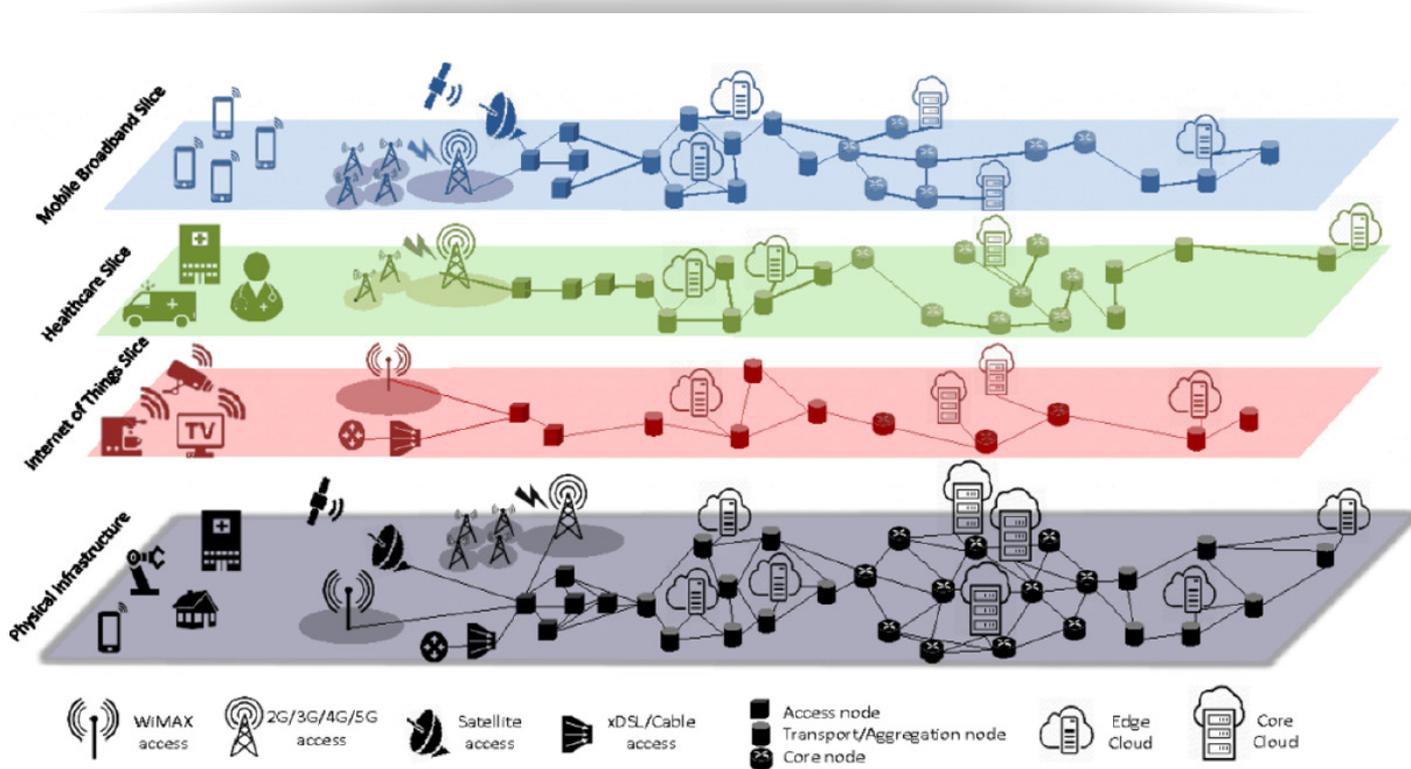


Figure 9 - Tranches de réseau 5G fonctionnant sur un réseau sous-jacent commun multifournisseurs et multi-accès. Chaque tranche est gérée de manière indépendante et répond à un cas d'utilisation particulier. Source : Ordonez-Lucena and al. (14)

Cette possibilité de Slicing sera un moyen, notamment pour les PME, d'accéder à des garanties de services personnalisées (les plus grandes entreprises pourront, elles, préférer mettre en place des réseaux privés leur permettant de mieux contrôler leurs ressources et les contenus qui y transitent).

Actuellement, les problématiques d'allocation de ressources pour répondre à des situations extrêmement variées restent encore difficiles à appréhender. Ces nouvelles possibilités ne seront donc pleinement opérationnelles que lorsque la 5G sera totalement développée et permettra un traitement de bout-en-bout.

5G



» 1.2.3 | LA 5G, VERS LA CONVERGENCE DES TECHNOLOGIES POUR L'IOT

Comme nous l'avons vu, l'une des principales promesses de la 5G est de pouvoir assurer une connectivité améliorée dans le domaine de l'Internet des Objets (et de la communication Machine à Machine). Ceci suppose de relever le défi de l'hétérogénéité des usages et des besoins c'est-à-dire de réussir à concilier, de façon cohérente et raisonnée, les besoins de l'Internet des objets :

- **Bas débit** : par exemple, pour des capteurs permettant des mesures (suivi de consommation d'eau par exemple, mesures de températures, ...), ou le suivi de localisation de matériels («tracking») ... Ce sont des objets à longue durée de vie, donc souvent associés à une nécessité de faible consommation énergétique, et pour des couvertures «longues distances»;
- **Haut débit** : par exemple pour des usages de télésurveillance et de gestion à distance, avec des besoins de transfert de plus gros volumes de données et avec un temps de latence réduit ;
- **Critique** : pour des usages de type véhicules autonomes par exemple, où la quantité de données échangée est importante, où la fiabilité doit être totale, et la latence minimale.

Pour y parvenir, la 5G s'appuiera sur différentes composantes :

»» UNE INTEROPÉRABILITÉ ACCRUE POUR RÉPONDRE À DIFFÉRENTS BESOINS AU SEIN D'UN MÊME RÉSEAU

Pour cela, le 3GPP a décidé d'intégrer dans les spécifications de la 5G, «en natif», la compatibilité avec les technologies **LTE-M** et **NB-IoT** (qui existent déjà en tant qu'extensions du réseau 4G LTE). Ces dernières font partie de la famille **des LPWAN** (Low Power Wide Area Networks) qui répondent au besoin de communications à **faible consommation énergétique et à large couverture**. Jusque-là ces besoins sont couverts par différentes solutions : des réseaux LPWAN «non cellulaires» (sans carte SIM) tels que SigFox (réseau «propriétaire») et LoraWAN, ou bien des réseaux cellulaires tels que les réseaux 2G/3G, plus coûteux en énergie, lorsqu'une couverture étendue est recherchée (notamment pour l'IoT mobile).

L'intégration du LTE-M et le NB-IoT dans les standards de la 5G offre une réponse à différents types d'usage, par un même réseau et avec une couverture étendue. Comme les autres technologies LPWAN, NB-IoT et LTE-M assurent une grande portée (de l'ordre du km en zone urbaine et jusqu'à 10 km en zones rurales) et permettent d'optimiser la consommation. Pour cela, elles valorisent des mécanismes de planification des temps de repos (sans se détacher du réseau) et de gestion étendue de l'inactivité des objets, ce qui permet d'optimiser le coût énergétique et de viser des durées de vie des batteries jusqu'à 10 ans. Elles peuvent par ailleurs offrir des avantages liés habituellement aux réseaux GSM, par exemple (et en particulier pour le LTE-M) :

- l'itinérance (ou «roaming») c'est-à-dire la capacité à assurer le relai d'un opérateur à l'autre ,
- le «handover» c'est-à-dire la capacité à maintenir le transfert de données sans interruption lors d'un passage d'une zone à une autre (ce qui est un élément important pour fiabiliser les connexions en mobilité)

Nb-IoT (NarrowBand IoT)	LTE-M
<ul style="list-style-type: none"> - débits de 20 à 250Kbit/s - communication bidirectionnelle - latence de l'ordre de la seconde (voire la dizaine de secondes) - bonne pénétration en intérieur <p>NB-IoT se rapproche de LoRa et SigFox en termes d'usages. Il permet une meilleure portée mais au détriment de la consommation.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - débit maximal théorique est de l'ordre de 1Mb/s (ce qui est très supérieur à SIGFOX ou LoRaWan mais reste inférieur à la 4G LTE «classique»), - communication bidirectionnelle - latence (<100 ms) - gère la voix en plus des données (ce que ne propose pas le NB-IoT) - Handover et roaming <p>LTE-M permet un meilleur débit que les autres LPWAN mais consomme beaucoup plus.</p>



Pour le moment, ces technologies reposent sur le réseau 4G. Ce que la 5G promet, c'est la continuité. Ces technologies sont «5G ready» c'est-à-dire qu'elles pourront être facilement mises en œuvre dès que la 5G pour l'lot massif sera déployée (ce qui n'est pas encore le cas) ...

>> LE EDGE COMPUTING POUR RÉPONDRE AUX IMPÉRATIFS DE FAIBLE LATENCE ET DE L'IOT CRITIQUE

Le **Edge computing** est une forme d'architecture informatique et un ensemble de méthodes permettant de traiter les données à la périphérie du réseau, c'est-à-dire au plus près de la source des données. C'est une tendance lourde de développement depuis plusieurs années, poussée notamment par le développement de l'intelligence artificielle.

Le Edge computing est une alternative au «Cloud computing» aujourd'hui largement employé dans le domaine de l'Internet des objets, où des données collectées via différents capteurs et appareils mobiles sont envoyées sur des serveurs distants pour être traitées et analysées. Le Cloud computing est un moyen d'accéder à de grandes puissances de calcul mais implique nécessairement des délais de traitement : délai de remontée d'une demande et/ou de données collectées de l'objet vers le cloud et/ou délai pour la réponse à la demande du Cloud vers l'objet. Avec l'augmentation du volume de données générées et des demandes croissantes en matière de traitement en **temps réel**, ce type de fonctionnement ne peut apporter des réponses totalement satisfaisantes en termes de latence. Par exemple, si un véhicule autonome doit réagir face à un obstacle, son temps de réponse doit être immédiat et ne doit pas dépendre d'un traitement effectué dans le Cloud. Par ailleurs, selon les types de capteurs concernés, le Cloud Computing peut exiger un gros trafic de données, peu compatible avec une stratégie d'optimisation de la bande passante.

En Edge computing la puissance de traitement est décentralisée : au lieu d'être transmises à un Data Center distant, les données sont traitées soit directement au niveau de l'objet qui les génère, soit sur une unité de traitement à proximité : ordinateur ou serveur local. Cela permet de réduire la latence et de réduire la circulation des données à l'échelle du réseau.

Or, nous l'avons vu, la 5G est pensée pour utiliser une architecture virtualisée permettant de distribuer les fonctions de réseau, c'est-à-dire permettant de faire varier leur emplacement du cœur de réseau vers sa périphérie. Elle pourrait donc constituer un accélérateur des technologies Edge Computing. Et inversement, le Edge Computing devrait permettre d'accompagner la réponse aux usages de l'IoT critique. On s'attend donc à un développement conjoint des 2 écosystèmes.

A terme, il est prévu que les réseaux 5G puissent s'appuyer sur :

- La puissance de calcul offerte par le **Cloud Computing**, reposant sur l'utilisation de gros « data center » collectifs ou des serveurs gérés en réseaux privés, pour des usages avec délais de traitement non critiques,
- Une puissance de calcul intermédiaire et une latence réduite offerte par des petits «Data centers» de proximité qui pourraient être déployés au niveau des antennes 5G (avec, pour les opérateurs, de nouvelles offres de services à la clé). C'est ce que l'on désigne par le terme « **Edge Cloud** »,
- Une puissance de calcul plus réduite mais immédiate, embarquée au plus près des objets connectés, avec le **Edge Computing**.

Tout ceci appelle encore de nombreuses réflexions et évolutions, notamment sur les aspects de sécurité des données. En effet, en s'affranchissant d'un mode centralisé, on peut aussi introduire d'autres niveaux de failles de sécurité...



On retient :

- > Annoncée comme une **rupture technologique**, la 5G promet de satisfaire le grand public et tous les secteurs de l'économie.
- > Les besoins à couvrir relèvent de différentes catégories de performances semblant parfois incompatibles entre elles. La 5G mise sur la **convergence de technologies** pour y parvenir.
- > **Le haut débit mobile amélioré** pourra se baser sur un spectre de fréquences élargi, avec notamment de nouvelles gammes d'ondes (dites «millimétriques») offrant l'accès au débit à très larges bandes. De nouvelles technologies d'antennes permettront de gagner en puissance et en efficacité spectrale.
- > **La faible latence et la haute disponibilité** pourront être obtenues grâce à des techniques optimisées de transmission de l'information (modulation et multiplexage) mais également la rencontre avec d'autres technologies, comme le Edge computing par exemple.
- > **L'internet des objets massif** permettra de connecter un nombre toujours croissant d'objets aux besoins hétérogènes. A ce jour, ce type d'usage n'a pas encore été normalisé mais, en anticipation, la 5G prévoit l'intégration des technologies dédiées à la connectivité IoT : le NB-IoT et le LTE-M.
- > En valorisant les nouvelles possibilités de virtualisation des fonctions de réseau et de contrôle centralisé des ressources réseau, **une nouvelle architecture de réseau** devrait voir le jour. Le **Network Slicing** découpera le réseau en tranches, où chaque tranche constituera un réseau virtuel adapté pour répondre aux exigences d'un usage donné.
- > La 5G existe pour le moment surtout au travers d'un **«standard»** décrit et spécifié par des consortiums de normalisation des télécoms à l'échelle mondiale. Si le déploiement a commencé en vue de répondre au besoin d'un débit accru dans les zones urbaines, **certaines spécifications sont encore attendues et la mise en œuvre en est encore à ses balbutiements.**

PARTIE 2 :

QUELS USAGES, QUELS BESOINS DE CONNECTIVITÉ EN AGRICULTURE ?

2.1. On imagine ?

Difficile de prédire ce que seront véritablement les usages en agriculture dans les 10 à 15 prochaines années et donc les besoins de connectivité qui y seront liés.

Les cas d'usage qui se développeront seront ceux qui apporteront le plus de valeur pour atteindre les objectifs actuels de l'Agriculture : **améliorer la productivité, la qualité, la rentabilité, et la durabilité de la production agricole en optimisant l'efficacité des ressources et la qualité de vie de l'agriculteur.**

Dans cette perspective, il est probable que les voies déjà engagées vont continuer à se développer :

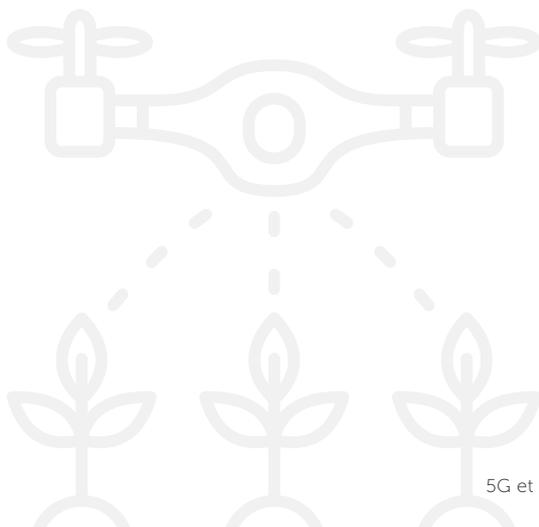
- **L'agriculture de précision** : un mode de gestion basé sur l'acquisition de données, leur traitement et leur valorisation, à différentes échelles de temps et d'espace, pour une meilleure aide à la décision. L'agriculture de précision permet de caractériser précisément les besoins et les facteurs de production en vue d'actions modulées : la bonne quantité d'intrant au bon endroit, au bon moment.
- **La robotique agricole ou plus largement l'automatisation** et le pilotage à distance des **agro-équipements** qui offrent aux exploitants de nouvelles possibilités de gagner en temps et en efficacité.

Certains équipementiers, comme John Deere, nous proposent quelques vidéos d'anticipation pour percevoir ce que pourrait être l'avenir de l'agriculture connectée : voir par exemple https://www.youtube.com/watch?v=6n_elgUQn7k

Pour notre part, sans trop chercher à extrapoler et seulement pour se fixer les idées, tentons une projection. Sur les deux pages suivantes, nous présenterons des exemples d'applications pour deux filières (végétale et animale), où la connectivité pourrait occuper une place importante. Il s'agira d'une description forcément non exhaustive de cas réalistes (mais pas totalement réels aujourd'hui) en mélangeant des usages et des technologies :

- déjà valorisés dans les exploitations,
- existants mais à un niveau moindre de maturité, de performance ou d'adoption,
- et d'autres encore en début de déploiement, voire de R&D.

Puis nous confronterons cette vision avec la situation actuelle, en repartant de cas d'usage précis et en essayant d'identifier les besoins, les verrous en matière de connectivité et, éventuellement, la plus-value que pourrait apporter la 5G. Nous nous baserons pour cela sur différents entretiens réalisés dans le cadre de cette étude auprès d'acteurs du secteur agricole et de l'AgTech.



Du côté des animaux : les technologies de l'élevage de précision aident l'éleveur à assurer ses objectifs de production en quantité et en qualité, tout en maîtrisant l'impact environnemental et en veillant au bien-être des animaux. Des robots et cobots aident l'exploitant et ses salariés à répartir leur temps de travail et réduisent la pénibilité de certaines tâches.

5) Des objets connectés, situés sur l'animal ou dans son environnement immédiat, remontent en continu des mesures, des sons, des images et des vidéos utiles à l'identification des animaux, leur géolocalisation et au suivi d'indicateurs de santé, d'activité, de comportement, de production et de reproduction. Le traitement en temps réel par des algorithmes d'intelligence artificielle des données abondantes ainsi recueillies permet d'identifier très précocement ou de prédire des anomalies de santé, d'ambiance et de comportement des animaux, susceptibles de dégrader la production ou le bien-être. Grâce à son tableau de bord en ligne, l'éleveur suit les indicateurs, reçoit des alertes en cas de problème et dispose d'éléments objectifs qu'il peut croiser avec son expertise et celle de ses conseillers pour prendre les décisions adaptées.

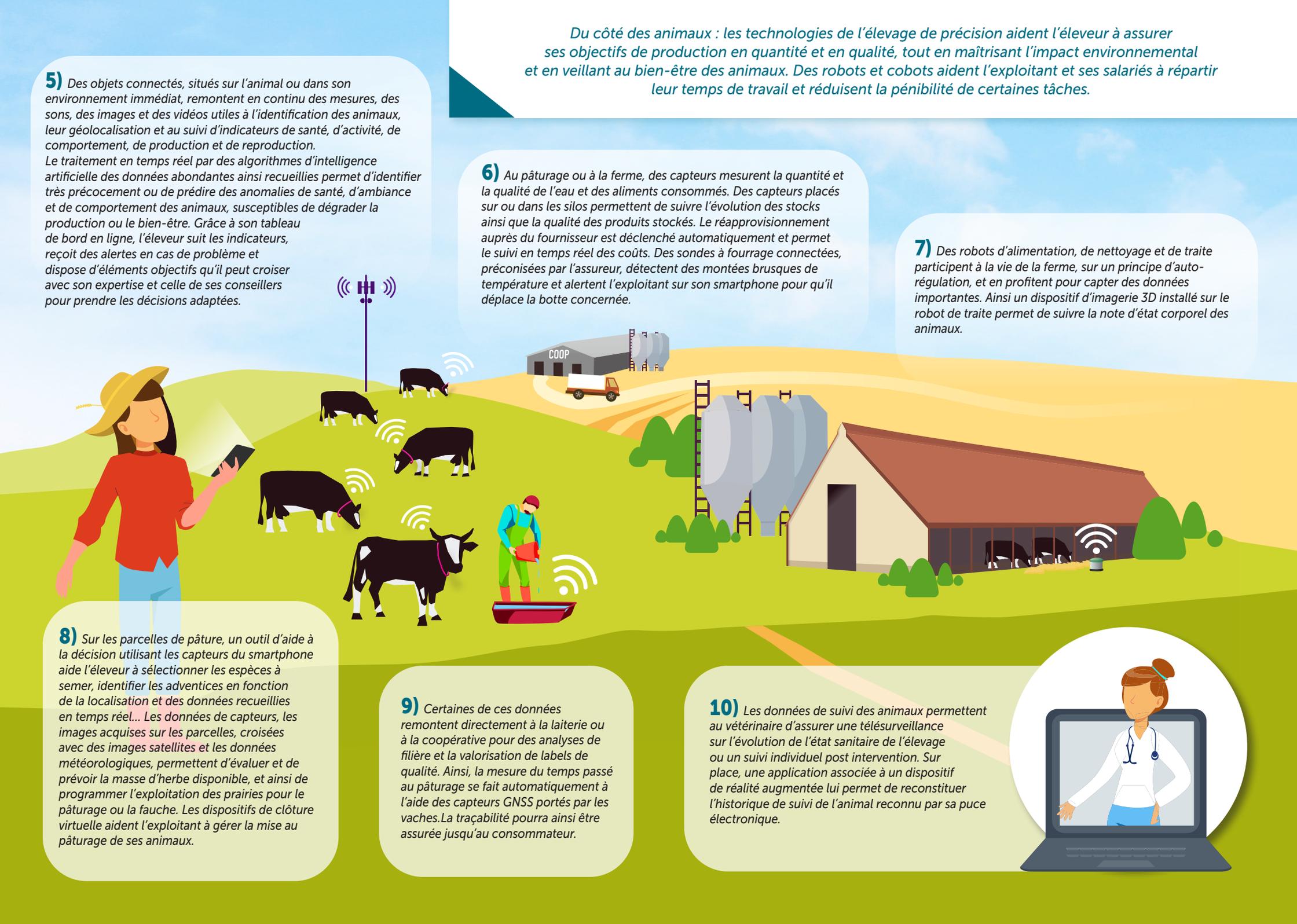
6) Au pâturage ou à la ferme, des capteurs mesurent la quantité et la qualité de l'eau et des aliments consommés. Des capteurs placés sur ou dans les silos permettent de suivre l'évolution des stocks ainsi que la qualité des produits stockés. Le réapprovisionnement auprès du fournisseur est déclenché automatiquement et permet le suivi en temps réel des coûts. Des sondes à fourrage connectées, préconisées par l'assureur, détectent des montées brusques de température et alertent l'exploitant sur son smartphone pour qu'il déplace la botte concernée.

7) Des robots d'alimentation, de nettoyage et de traite participent à la vie de la ferme, sur un principe d'auto-régulation, et en profitent pour capter des données importantes. Ainsi un dispositif d'imagerie 3D installé sur le robot de traite permet de suivre la note d'état corporel des animaux.

8) Sur les parcelles de pâture, un outil d'aide à la décision utilisant les capteurs du smartphone aide l'éleveur à sélectionner les espèces à semer, identifier les adventices en fonction de la localisation et des données recueillies en temps réel... Les données de capteurs, les images acquises sur les parcelles, croisées avec des images satellites et les données météorologiques, permettent d'évaluer et de prévoir la masse d'herbe disponible, et ainsi de programmer l'exploitation des prairies pour le pâturage ou la fauche. Les dispositifs de clôture virtuelle aident l'exploitant à gérer la mise au pâturage de ses animaux.

9) Certaines de ces données remontent directement à la laiterie ou à la coopérative pour des analyses de filière et la valorisation de labels de qualité. Ainsi, la mesure du temps passé au pâturage se fait automatiquement à l'aide des capteurs GNSS portés par les vaches. La traçabilité pourra ainsi être assurée jusqu'au consommateur.

10) Les données de suivi des animaux permettent au vétérinaire d'assurer une télésurveillance sur l'évolution de l'état sanitaire de l'élevage ou un suivi individuel post intervention. Sur place, une application associée à un dispositif de réalité augmentée lui permet de reconstituer l'historique de suivi de l'animal reconnu par sa puce électronique.



2.1. Des besoins actuels aux gains attendus

Par rapport à toutes ces possibilités, tout ne dépendra pas des seuls réseaux mobiles. Aussi, pour y voir plus clair sur l'opportunité de la 5G, repartons des usages actuels et essayons d'analyser le besoin, la façon dont il est couvert à l'heure actuelle et ce que la 5G pourrait apporter.

Pour cela, nous proposons de considérer :

> Des cas d'usages plutôt liés à la remontée d'informations depuis des capteurs (Champ vers Cloud) : Contrôle et suivi des facteurs de productions, des plantes et animaux



CAS 1

Station météorologique
(Bas débit)



CAS 2

Piège connecté avec vision
(Débit Moyen)



CAS 3

Monitoring de troupeau
(En intérieur)

> Des cas d'usage nécessitant remontée d'observations et action sur le terrain



CAS 4

Le capteur de rendement
(Données massives)



CAS 5

Désherbage par solution robotisée
(Données massives et temps réel)

> Des cas d'usages liés aux opérations à distance et à la communication de machine à machine.



CAS 6a

Correction de signal RTK
(Temps réel)



CAS 6b

Télémétrie et gestion de flotte
(Temps réel)



CAS 6c

Pilotage à distance et automatisation /robotisation
(IoT critique)

Cet inventaire n'aura bien entendu aucun caractère d'exhaustivité et a pour seul objet de préciser certaines problématiques.

Par ailleurs, le choix d'une connectivité n'est jamais anodin et s'évalue par le prisme de différents critères tels que :

- ◆ La latence
- ◆ Le débit
- ◆ La sécurité de la communication
- ◆ La mobilité
- ◆ La localisation
- ◆ L'accessibilité (en extérieur/en intérieur, en présence de relief, ...) et la nécessité de devoir ou pas maintenir / mettre à jour le dispositif
- ◆ La consommation énergétique
- ◆ La fiabilité du réseau
- ◆ Le nombre d'objets à connecter
- ◆ Le coût...

Dans la présentation des cas d'usage, nous aurons nécessairement une approche très simplificatrice et ne considérerons que certains de ces critères.

Cas 1 : la station météorologique

OBJECTIFS : disposer d'une information ultra localisée pour identifier les plages optimales d'intervention dans la journée, disposer de prévisions (à 15 jours) pour optimiser les itinéraires cultureux, anticiper le risque de maladie.

DISPOSITIF : une station sans fil implantée sur pied dans une parcelle, incluant éventuellement différents capteurs (pluviomètre, anémomètre ...) et la géolocalisation (puce GNSS). Les données collectées sont envoyées sur un serveur pour être accessibles sur une application smartphone dédiée et/ou intégrées dans des outils d'aide à la décision de différents fournisseurs.

BESOIN :

- ◆ **Estimation du «temps réel» :** au minimum, l'utilisateur a besoin d'une visibilité sur les conditions météo dans l'heure à venir par exemple.
- ◆ **Data :** Les données captées sont de type «mesures». Chaque transfert correspond à une très faible quantité de donnée (<50 octets) et un transfert toutes les 15 mn, par exemple, suffit pour une actualisation plusieurs fois par jour des paramètres calculés (somme des températures...) et une alerte «en temps réel» de l'exploitant (courriel, notification ou simple sms).
- ◆ **Portée (remontée des données) :** potentiellement plusieurs kilomètres entre l'objet et l'antenne.
- ◆ **Autonomie :** Parce qu'elles sont isolées dans les parcelles, les stations doivent pouvoir nécessiter un minimum d'entretien et être relativement autonomes en énergie : si le fonctionnement se fait sur batteries, elles doivent durer plusieurs années (de l'ordre de 5 ans au moins). La faible consommation est donc un critère clé.



Figure 10 - la station Meteus (@Isagri)

TYPE DE BESOIN : «bas débit/longue distance».

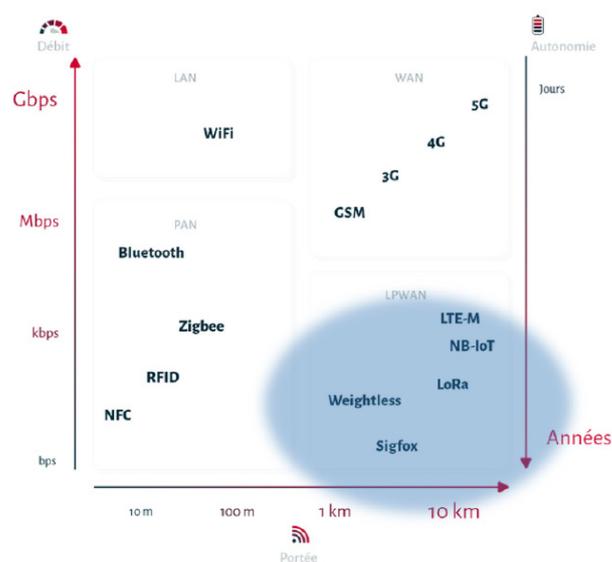
Dans la même catégorie : les sondes tensiométriques ou capacitatives pour caractériser le sol, les colliers connectés pour les ruminants, ou autre dispositif fixe permettant la collecte de mesures, de variations de mesures ou de simples changements d'état, avec un nombre de messages limités dans la journée.

> Comment ce besoin est-il couvert aujourd'hui ?

Très souvent par des **réseaux spécialement dédiés à l'IoT basse consommation de type LPWAN**. Offrant une portée jusqu'à une douzaine de km en zone rurale, en s'affranchissant de la problématique des zones blanches (mais pas toujours de problèmes liés au relief), ils sont spécifiquement conçus pour répondre aux problématiques de basse consommation et d'économie de la bande passante. Ainsi, ils ne permettent que des transferts de petits volumes de données (300bits/s à 50 kbits/s), et pas en continu. En France, les réseaux «non cellulaires» sans ou sous licence (c'est-à-dire en passant ou non par des opérateurs réseaux «classiques») couramment utilisés sont **LoRaWan ou SigFox**. Les solutions LoRaWan peuvent être proposées par les opérateurs (Orange - LiveObjects - et Bouygues - Objenious-). Cependant un réseau GSM (niveau 2G) peut être préféré pour **déployer simplement dans différents pays avec une garantie de couverture suffisante**. Une carte SIM multi opérateurs est alors nécessaire.

> La 5G changerait-elle la donne pour ce type de besoins ?

A priori, non. En tout cas, pas si la basse consommation est le critère essentiel. Les technologies LTE-M et NB-IoT intégrées à la 5G vont probablement venir concurrencer LoRaWan et Sigfox mais ne permettront pas de satisfaire de fortes contraintes de consommation. Si, par rapport aux réseaux cellulaires classiques, le gain de consommation en énergie est d'un rapport 1 à 3 (fois moins d'énergie). Avec Lora et SigFox, on reste sur un rapport 1 à 10 !



Les technologies LTE-M et NB-IoT se positionnent un peu sur le même marché que Lora et Sigfox. Les débits devraient être plus flexibles et plus importants. La couverture devrait être mieux garantie et la fiabilité également. La sécurité pourrait aussi être meilleure. Probablement au prix d'une consommation et d'un coût un peu supérieurs. Le sens descendant (gateway vers objets) est aussi un point faible de LoRa et SigFox et pourrait être amélioré par la 5G. Pour la répartition des objets et la sensibilité aux obstacles, cela ne devrait pas changer grand-chose (je pense que le NB-IoT pourra utiliser la bande des 700 MHz assez proche du 868 MHz utilisé par LoRa et SigFox). J'emploie ici beaucoup le conditionnel car les opérateurs ne sont pas encore tout à fait prêts. [...] Maintenant, est-ce que les opérateurs déploieront des réseaux suffisamment fiables dans toutes les campagnes pour couvrir les champs et les bovins ? Pas sûr. Je crois qu'il ne faut pas attendre et que si LoRa ou SigFox font l'affaire, il est inutile d'attendre une potentielle 5G.

Pr. Laurent Clavier, IMT Lille Douai, Univ. Lille, CNRS

Bien sûr, d'autres critères peuvent jouer, comme le coût par exemple, si par effet d'adoption massive de la 5G, les coûts des composants adaptés au LTE-M ou au NB-IoT devenaient plus compétitifs. Rien ne permet de l'affirmer à ce stade.

Extrait du livre blanc « Connectivity, protocols, security and IoT needs : a compass to find a path » diffusé par Orange Business Services (15) :

LoRaWAN®, LTE-M et NB-IoT : les tests effectués confirment le positionnement des connectivités sur la consommation de batterie : LoRaWAN® d'abord, puis NB-IoT et enfin LTE-M. Les facteurs de gain dépendent fortement des conditions et des protocoles radio.

Tout en tenant compte de la maturité et de la simplicité, LoRaWAN® est une bonne solution pour l'Internet des objets de faible puissance. LTE-M et NB-IoT : une utilisation de base de la LTE-M et du NB-IoT est possible, mais n'apportera qu'un avantage en termes de portée. L'optimisation des batteries nécessitera l'utilisation de fonctions avancées (eDRX, PSM) qui sont complexes à manipuler et qui peuvent varier d'un réseau/géographie à l'autre : cela nécessitera une expertise et des tests importants, en laboratoire et sur le terrain. La complexité des LTE-M et NB-IoT devrait conduire à préférer les partenaires/fournisseurs de dispositifs expérimentés, qui non seulement maîtrisent les protocoles, mais aussi effectuent des tests avec des experts et dans différentes géographies/conditions.

Cas 2 : le piège connecté avec capteur optique

OBJECTIFS : surveillance de l'apparition de ravageurs, soit à l'échelle d'une exploitation, d'un réseau d'exploitations (via une coopérative par exemple), d'un territoire (épidémiologie-surveillance)

DISPOSITIF : un piège sur pied, constitué d'un dispositif de piégeage (nasse, entonnoir, plaques engluées...) et d'un boîtier intégrant une caméra et un logiciel d'analyse d'image pour dénombrer les ravageurs collés sur ces plaques.

BESOIN :

◆ **Estimation du «temps réel» :** la plaque est analysée plusieurs fois par jour et le piège renvoie le nombre de ravageurs suivis comptés sur la plaque. Le temps réel est donc ici de l'ordre de quelques heures (mais 1 à 3 envois/jour peuvent suffire).

◆ **Data :** Sens remontée des données : ordre de grandeur (4Mo compressés en 1 Mo, une plus grande résolution peut être utile pour le traitement de l'image). Une liaison descendante peut également être nécessaire pour la mise à jour des pièges.

◆ **Autonomie et portée :** Idem cas 1 - Quand l'exposition le permet, l'alimentation peut être assurée par un petit capteur solaire.

> Comment ce besoin est-il couvert aujourd'hui ?

Sans capteur vision, un réseau de type SigFox ou LoRaWAN suffirait mais si l'image associée au dénombrement est envoyée avec le message, pour expertise supplémentaire, une solution plus performante en termes de débit, au moins de niveau 3G, est requise. Lorsqu'elle est disponible, la 4G peut évidemment couvrir ce besoin.

TYPE DE BESOIN : «Débit moyen»

Dans la même catégorie : station météo avec capteur optique, capteur fixe de phénologie ou de biomasse, suivi de matériel d'irrigation avec caméra installée sur pivot...



Figure 12- @Cap 2020

> La 5G changerait-elle la donne pour ce type de besoins ?

La 5G, dans une vision large, pourrait en effet apporter du changement. Les opérateurs annoncent la fin de la 2G (puis de la 3G) à partir de 2021... Selon eux, ces technologies sont obsolètes et trop coûteuses à entretenir. Ils souhaitent par ailleurs pouvoir récupérer les ressources (spectrales notamment) pour les générations plus évoluées 4G ou 5G. Les utilisateurs auront alors 3 à 4 ans pour changer de technologie. Si la 4G permet déjà de répondre au besoin, le LTE-M peut également constituer une alternative permettant de concilier basse consommation et couverture étendue avec un niveau de débit satisfaisant. Bien entendu, sous réserve de ne pas être en zone blanche...

Parce qu'elle peut permettre une offre étendue, couvrant différents niveaux de besoins au travers d'un réseau unique, la 5G peut laisser espérer une plus grande facilité d'adoption des technologies numériques en agriculture. Or, il existe un enjeu lié au fait de pouvoir dégager plus de valeur des données, en dépassant le stade de la simple analyse descriptive, grâce à une collecte plus large et au croisement de données de différentes sources (capteurs, satellites, base de données génétiques...), à différentes échelles de temps et d'espace.

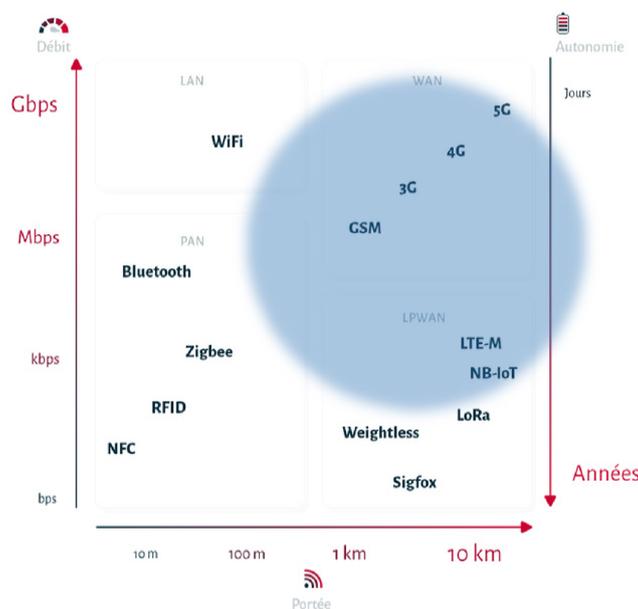


Figure 11- Positionnement des différents réseaux sans fil (Source du graphique : Matooma.fr)

L'ajout de valeur viendra de la capacité à croiser les données : des données de capteurs avec des données satellites, par exemple. Le problème lorsque l'on travaille sur le vivant est qu'il y a tellement de paramètres à prendre en compte qu'il est difficile de tous les prévoir à l'avance. Si on simplifie trop, on passe à côté de certaines choses. Ce n'est pas résoudre les problèmes qui est difficile : c'est de les identifier. Il nous faut donc regarder plus large. Ce sont les «use case augmented» : passer du simple descriptif au prédictif, modéliser à différentes échelles. Les cas d'usage on les connaît, et en agriculture, on a été très créatifs ces dernières années. Mais ce qui pose problème, ce sont les modèles économiques et c'est probablement la vraie révolution qu'il faut attendre de la 5G. [...] Il y a un passage à l'échelle nécessaire et pour le moment, seuls les très gros éditeurs ou les gros équipementiers peuvent s'en sortir. Cela se joue notamment côté Hardware où il faut pouvoir optimiser le moindre centime sur les composants.

Alexis Comar, Founder et CEO, Hiphen .

Par la 5G, ce sont donc aussi des questions d'**industrialisation qui pourraient être abordées. Pour être adoptées les solutions numériques doivent en effet pouvoir être proposées à un prix abordable pour les utilisateurs et être rentables pour ceux qui les produisent...**Mais, à ce stade, la massification de l'Internet des objets agricoles, même avec les promesses de la 5G, ne semble pas si évidente :

Aujourd'hui, on essaye d'équiper nos exploitations avec au moins un capteur. Pour une station météo, un capteur de sol, ... on est tout de suite sur des coûts minimums de 500 euros, avec des abonnements annuels pour l'accès aux données. Donc il faut pouvoir garantir le retour sur investissement. Pour le moment, on arrive sur la nouvelle génération qui est plus sensible aux objets connectés mais on n'est pas encore à en mettre partout ! L'IoT massif, ce n'est pas encore pour demain ! Les portefeuilles et les mentalités doivent encore évoluer.

Baptiste Cuny, Responsable Innovation Services – Service Agronomique, Maisadour / Agralia

Ce qui est massif c'est un stade avec tous les spectateurs (dizaines de milliers) équipés de smartphones. Pour nous, si on arrive à plusieurs centaines de capteurs dans une même zone, ça sera tout. En élevage, si on veut surveiller correctement un troupeau, c'est chaque vache qui doit être équipée. Mais des troupeaux de plus de 1000 vaches, il n'y en a pas beaucoup en Europe. On est loin de l'IoT massif.

Viktor Toldov, CTO, Lituus

L'IoT massif en agriculture, je n'y crois pas trop, ou en tout cas pour un déploiement limité. Je crois plutôt, mais parce que c'est mon métier, à des capteurs positionnés sur des machines qui circulent dans les champs et non à une multitude de capteurs disséminés dans une même parcelle.... C'est plus simple pour la maintenance, éviter les vols et rajouter des cas d'usage. Cela dit, il y a de beaux exemples qui commencent à marcher, Sencrop par exemple qui a développé des stations connectées qu'on voit un peu partout dans les champs, mais je ne suis pas sûr de l'intérêt de descendre à une échelle encore plus fine pour ce qui relève de la variabilité intra-parcellaire.

Colin Chaballier, General Manager, Exxact Robotics



Cas 3 : le boîtier multicapteurs de monitoring de troupeau en intérieur.

(Analyse de G. Le Lay, Copeeks)

OBJECTIFS : S'assurer du bien-être des animaux et des bonnes conditions de production par un suivi en continu des paramètres d'ambiance et des comportements des animaux.



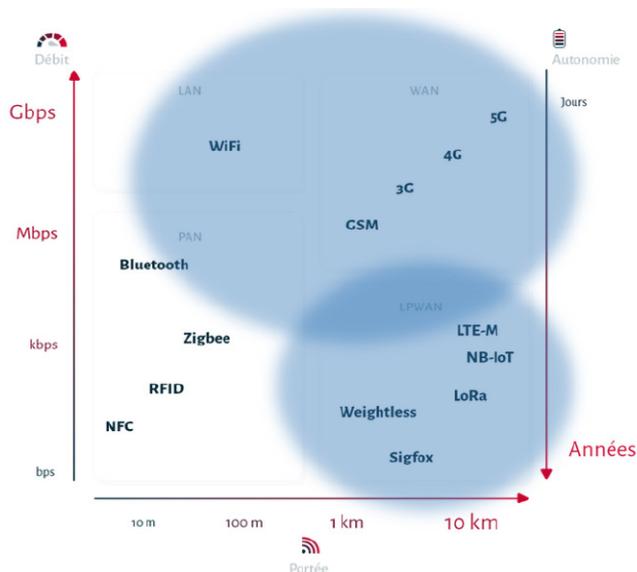
Figure 13- @Copeeks

DISPOSITIF ET BESOIN : Un boîtier placé à l'intérieur d'un bâtiment d'élevage collecte les niveaux de CO₂, NH₃, la température et l'humidité, et envoie les données sur un serveur toutes les 10 à 15 minutes (un message avec quelques données de capteurs = 60 Octets). Le boîtier peut également être équipé d'une caméra pour l'acquisition de vidéos et photos qui, analysées en temps réel, permettent de déterminer le niveau d'agitation des animaux, leur localisation dans l'espace ou encore leur posture ou encore le niveau de bruit. Une photo prise par un boîtier en élevage (Résolution 3280x2464) : 4 Mo. Une séquence vidéo de 15 secondes prise en élevage (Résolution HD / Nombre d'images par seconde : 15 / Débit de codage vidéo MP4 : 1 Mbps) : 15 Mo.

> Comment ce besoin est-il couvert aujourd'hui ?

Du fait de la connectivité très variable liée au déploiement très hétérogène des antennes mobiles des opérateurs, **le principe retenu est de s'adapter à la vitesse de transfert disponible.** Pour de simples mesures d'ambiance, on en revient à un cas « bas débit ».

Si le boîtier est doté de capteurs et d'une caméra, il doit nécessairement communiquer avec un réseau « haut-débit ». Pour cela, les boîtiers sont équipés d'un module 4G (au lieu du module LoRA standard) via une carte SIM multi-opérateurs. Si un accès Internet haut-débit (Livebox, Bouygues Box, Freebox...) est disponible. Connexion au réseau Wifi. Dans ce cas, le boîtier n'active pas sa 4G. Les technologies « in-door » pour le haut-débit sont : Wifi ou réseau 4G privatif. Le Wifi est intéressant mais il faut mettre beaucoup d'antennes ou amplifier le signal surtout dans les élevages où les toits sont métalliques, les murs épais en béton armé ce qui provoque une baisse de la portée du signal. Il n'y a pas d'infrastructure Wifi agricole. En général les solutions mises en œuvre sont celles destinées aux habitations (Box ADSL, réseau Ethernet ou Wifi). Certains gros élevages commencent à déployer des réseaux Ethernet et Wifi dans tous leurs bâtiments.



> La 5G changerait-elle la donne pour ce type de besoins ?

Il est actuellement impossible de faire du « temps-réel » en vidéo ou en photo. En général entre la prise d'une image ou d'une séquence vidéo par un boîtier et la visualisation de cette information sur la plate-forme située sur l'internet, il faut compter entre 2 et 3 minutes car les transferts sont parfois très laborieux surtout dans les bâtiments d'élevage qui affaiblissent le signal radio reçu de l'antenne mobile la plus proche. C'est une très grosse limitation pour robotiser les élevages par exemple. Il y a un délai donc un risque de ne pas percevoir ce qui se passe à « l'instant T ».

Ce qui est attendu de la 5G :

- Une mutualisation des bandes de fréquences pour regrouper à la fois les besoins « bas débit » et le « haut débit ». Reste à voir comment la 5G gèrera l'« indoor ». A ce jour, le cas est assez peu décrit pour le moment (du moins en dehors d'expérimentations dans certaines entreprises du secteur industriel).
- Traiter en temps réel les images et vidéos grâce à l'edge computing ou l'edge cloud (via éventuellement le développement de réseaux 5G privés dans les gros élevages), de façon que les données lourdes n'aient plus à remonter sur l'internet. Voir cas 4 et 5.

- Télépiloter les équipements sur un rail ou un câble à distance et le faire se positionner en temps réel à un endroit bien précis. (Brevet déposé par Copeeks).

Il serait alors possible de développer des salles de supervision d'élevages avec des opérateurs 24/24 qui suivraient en temps réel l'activité des animaux et pourraient interagir avec les équipements présents dans la salle, lancer des alertes et notifications.

Cas 4 : le capteur de rendement en vigne

OBJECTIF : estimer le rendement (nombre de grappes, de baies et volumétrie) à partir d'images des grappes de raisin collectées dans les parcelles, à différents stades de maturité. La mesure peut être réalisée automatiquement lors de travaux divers sur la vigne.

DISPOSITIF : embarqué sur un véhicule (tracteur, quad, enjambeur), il intègre un moyen d'éclairage des grappes (leds ou flash), un instrument de mesure de distance (pour déterminer la taille des grappes), une caméra très haute résolution.

BESOIN : à intervalle régulier de temps et/ou de distance, une image ultra haute résolution est prise. Exemple pour le projet Earn (données du Laboratoire IMS qui développe un capteur de ce type) : 2 images par mètre à 6 km/h (vitesse standard) soit un peu moins de 4 images par seconde. Chaque image (5 mégapixels) correspond à environ 2 Mo. Ces chiffres peuvent être multipliés par 2 si l'on prend une image de chaque côté du pied. Comptons environ 5Go/caméra/ha (pour un temps d'acquisition d'environ 1 heure), soit environ 50 Go pour 10ha/jour.

TYPE DE BESOIN : Données massives



Figure 14 - Un exemple de capteur de rendement : dispositif Vivelys (@Vivelys)

> La 5G serait-elle utile pour ce type de besoins ?

Ces dispositifs sont encore au stade de Recherche ou de R&D. En conditions expérimentales, les images sont acquises, récupérées sur support de stockage puis traitées ultérieurement au laboratoire grâce à des modèles Deep Learning. Ni les manipulations de fichiers, ni les délais ne sont alors des limites.

En conditions réelles, les solutions suivantes peuvent être discutées :

OPTION 1 : stocker de grandes quantités de données sur le capteur pour un traitement différé local (par exemple la nuit). Si le traitement a lieu sur une autre machine, un opérateur doit être mobilisé pour effectuer chaque transfert, ce qui peut être peu pratique. Si le traitement a lieu sur l'ordinateur embarqué : en supposant que l'on puisse disposer de 10h pour traiter les 25000 images, il faut que le traitement soit effectué en moins de 1.5 s/image. Ceci peut être une limite.

OPTION 2 : stocker de grandes quantités de données sur le capteur pour un traitement différé sur le Cloud. Avec un débit ADSL remontant actuel (au mieux 1 Mb/s) : 50 Go demanderaient 120h de chargement ! Pour que le temps de transmission (liaison montante) puisse descendre en dessous de 12h, il faut au minimum un débit 10 Mb/s et une très bonne fiabilité de transmission, ce qui est difficilement atteignable aujourd'hui dans les exploitations. **Avec un débit en liaison montante entre 20 et 50 Mb/s, comme pourraient le permettre la fibre optique (puisque le transfert peut avoir lieu une fois rentré à l'exploitation) ou la 5G, cette option est théoriquement possible** (2h à 5h de transmission). Il faut cependant encore ajouter le temps de traitement puis de retour du résultat.

OPTION 3 : transférer les données en temps réel pour un traitement en différé ou en temps réel sur le Cloud (cloud computing). Cette option permet d'éviter le stockage en local et de disposer de grosses puissances de calcul et donc d'un temps de calcul réduit pour le traitement des images et la mise à disposition des résultats. Les images peuvent être conservées et serviront à enrichir les bases d'apprentissage et on peut même imaginer un enrichissement en continu des modèles pour peu que les images puissent être annotées rapidement. La transmission doit cependant pouvoir être opérée à raison de 8 Mo/s voire 16 Mo/s (si 2 images), ce qui est difficile en 4G. **La 5G est alors nécessaire pour assurer le niveau de débit et la fiabilité requis.**

OPTION 4 : traiter en temps réel en embarqué (Edge computing). L'intelligence est embarquée sur les machines (ou au plus près). Les images sont traitées en local au moment de leur collecte et seul le résultat du traitement est gardé, les images en elles-mêmes ne sont stockées que le temps du traitement. Avantage : le traitement est immédiat, le besoin de connectivité est réduit à l'envoi du résultat du traitement : données 10 000 fois moins volumineuses (on peut toutefois imaginer que certaines images puissent être stockées ou transférées). Inconvénient : les images collectées sont perdues après traitement. Les traitements en local apportent une complexité supplémentaire pour la mise au point des algorithmes, qui doivent être optimisés par rapport à la puissance disponible sur le calculateur embarqué et sur les plans énergétique et thermique.

Sur ce cas d'estimation de rendement, le «temps réel» n'est pas lié à une nécessité de traitement immédiat (il est éventuellement contraint par le volume de données à récupérer après une journée d'acquisition). Aussi, si le traitement est possible en embarqué, une stratégie «edge computing» pourrait être préférée afin d'éviter le transfert d'énormes quantités de données. Si tel est le cas, la 5G n'apporte pas de vraie plus-value.

Mais voyons maintenant un cas similaire en termes de volume de données mais impliquant cette fois un besoin de traitement en temps réel.

Cas 5 : le désherbage par solution robotisée

Nous nous baserons sur la description d'un cas d'usage spécifiquement testé dans un environnement 5G, permettant ainsi d'estimer le type de performances envisageables : «Smart farming : Weed Elimination with 5G Autonomous Robots», GSMA/KPN, Février 2020 (16)

OBJECTIFS : proposer une solution de pulvérisation de précision pour l'élimination par désherbant chimique de plants de pomme de terre remontants (résidus d'une année sur l'autre) en culture de betterave sucrière.

DISPOSITIF : robot Robotti, porte-outils autonome alimenté par un moteur diesel, de la société de développement danoise, Agrobot. Le robot est équipé de caméras, pour l'acquisition des images des plantes, et de pulvérisateurs de précision reliés à un réservoir d'herbicide.

LA SITUATION DÉCRITE EST LA SUIVANTE : Les images sont envoyées depuis le robot à un serveur informatique de proximité (edge cloud) situé à La Haye via une connexion 5G. Le serveur héberge un algorithme deep learning formé pour reconnaître la betterave sucrière et des plants de pommes de terre en images (6000 images dans la base d'apprentissage). Une fois la classification effectuée sur le serveur de proximité, la réponse est renvoyée au robot. Si la réponse est «pomme de terre», le robot déclenche le pulvérisateur. L'ensemble du cycle prend **250 millisecondes** (20-25 ms pour l'aller-retour robot /serveur et 200-230 ms pour le traitement des images dans le cloud).

Cette durée de cycle permet de traiter **16 images/s (4 images/s x 4 caméras)** couvrant les 3m de largeur de travail. La vitesse du robot peut atteindre 5 km/h mais a été limitée à 3,5 km/h dans le cadre du test (soit 3300 m²/h ou 3h/ha).

TYPE DE BESOIN : Données massives et temps réel (IoT critique)

Dans la même catégorie : usage de drones agricoles exigeant un traitement des images en temps réel

L'étude annonce un résultat de 95% de plants de pomme de terre correctement identifiés et traités (4% d'erreur, en partie dus à la précision de pulvérisation).

> La 5G serait-elle utile pour ce type de besoins ?

Sans la 5G, il est déjà possible de traiter ce type de problème en embarquant les algorithmes d'intelligence artificielle sur la machine, comme nous l'avons vu dans le cas précédent. C'est actuellement le seul moyen d'obtenir un traitement en temps réel. Ici, la largeur de bande de la 5G qui autorise jusqu'à 120 Mb/s en liaison montante (chiffres cités dans le document), permettrait de se passer d'embarquer l'intelligence. D'après les auteurs, ceci offre les avantages suivants :

- mise à l'abri du centre de calcul, dans un environnement sans fluctuations d'humidité ou de température, et dans un environnement contrôlé (pour le refroidissement du matériel notamment),



Figure 15 - Le robot équipé. Source : (17)

- diminution de la complexité de conception et de l'équipement (donc du coût du robot)
- diminution de la consommation électrique du robot
- diminution du poids du robot et donc de l'impact sur le sol
- capacité à garder les images pour améliorer l'apprentissage (d'une fois sur l'autre, alors qu'à l'œil humain tout paraît semblable, il apparaît nécessaire d'enrichir le modèle avec de nouvelles images basées sur la situation présente).

Par ailleurs, en faisant en sorte que l'algorithme stocke dans un dossier séparé les images où une décision est incertaine, il est possible d'envisager des systèmes faisant intervenir un expert a posteriori. L'expert annote manuellement les images. Celles-ci sont intégrées à la base d'apprentissage et le modèle peut ainsi être amélioré.

D'autres cas d'usages impliquant des drones ont également été testés, avec le même type de dispositif (acquisition d'images par le drone, envoi sur un centre de traitement via le réseau 5G, traitement via des modèles deep learning puis envoi du résultat du traitement). Citons par exemple l'étude réalisée dans le cadre du projet 5G Rural Integrated Testbed (5GRIT), soutenu par le gouvernement britannique et impliquant un partenariat de petites et moyennes entreprises et d'universités pour la construction d'un banc d'essai 5G pour les zones rurales : (17).

Attention pour la prise en compte des résultats : il s'agissait d'une étude de faisabilité et donc d'une mise en œuvre dans le cadre d'un environnement 5G «idéal», avec utilisation d'ondes millimétriques.

Cas 6 : Véhicules / Robots connectés

Nous déclinons ce cas au travers de 3 types de besoins différents :

- La possibilité d'effectuer un travail de précision grâce à la correction de signal GNSS «RTK» ;
- La capacité à suivre le matériel à distance et à recueillir les données de travail : gestion de flotte et télémétrie ;
- La possibilité pour différentes machines de pouvoir communiquer entre elles ou à être pilotées à distance : Machine to Machine.

Cas 6a II Correction RTK pour autoguidage par GPS (valable aussi pour les drones)

OBJECTIFS : éviter les manques ou les surdosages lors des opérations culturales (semis, épandage, ...) en utilisant des dispositifs reposant sur une géolocalisation de précision pour guider efficacement les passages des engins.

DISPOSITIF : Les systèmes d'autoguidage et de coupures de tronçon utilisés en agriculture nécessitent une précision centimétrique (<10 cm) qui ne peut être obtenue par un un récepteur GNSS en mode naturel. La correction RTK (Real Time Kinematic) permet de transmettre en temps réel les données de correction d'une base d'observation aux récepteurs mobiles. Le plus souvent, le signal de correction est envoyé par une balise RTK fixe ou mobile par liaison radio. Les balises fixes étant particulièrement onéreuses et la transmission par radio étant sujette aux perturbations liées aux obstacles, il existe une alternative : la transmission du signal par un serveur relié à des stations de référence situées à proximité via le réseau de téléphonie mobile. (18) C'est de ce cas dont il est question ici.

BESOIN :

- **Temps réel :** on est bien ici dans un « vrai » temps réel puisque la correction doit pouvoir être disponible en continu au moment du passage de l'engin. Il y a donc un besoin « critique » sur ce plan.
- **Data :** le volume de données transférées est faible à moyen.
- **Portée :** les stations de références sont situées à moins de 30 km (indications d'Orpheon).

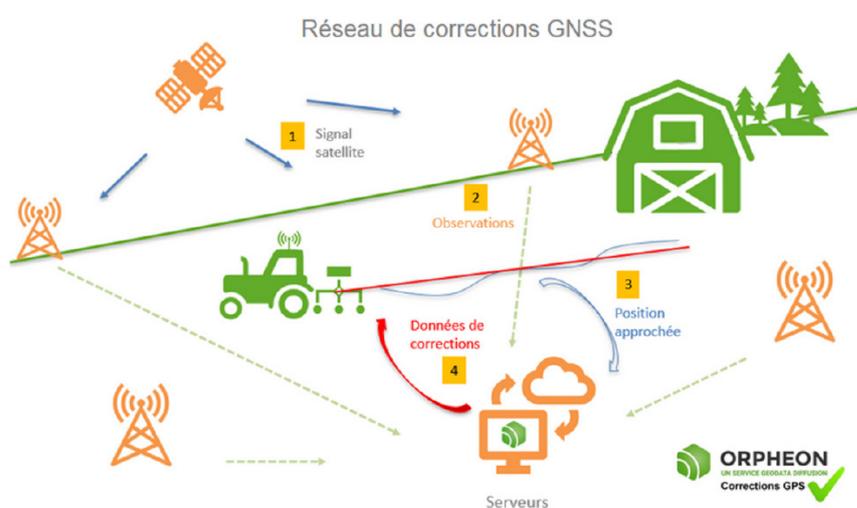


Figure 16- @Orpheon

> Comment ce besoin est-il couvert aujourd'hui ?

Les réseaux GPRS (2,5G ou 2G+) ou Edge couvrent bien le besoin mais la précision du signal est, de fait, dépendante du réseau de téléphonie mobile, donc impactée par les zones blanches. D'autre part, la qualité de réception dépend de la distance par rapport aux relais et de l'encombrement du réseau (les données GPRS étant moins prioritaires que la voix).

> La 5G changerait-t-elle réellement la donne pour ce type de besoins ?

Lorsqu'ils sont disponibles, les réseaux actuels suffisent et il existe bien sûr d'autres possibilités de connectivité pour assurer les services de géolocalisation de précision, notamment via les balises. Les acteurs du secteur agricole s'organisent déjà pour mutualiser les coûts (à l'échelle de réseaux de coopératives par exemple). Mais là encore, la 5G peut avoir une plus-value de confort d'utilisation et pourrait apporter la **fiabilité** qui fait aujourd'hui défaut. Elle pourrait permettre une meilleure qualité de signal grâce aux techniques de transmission optimisées. Par ailleurs, certains acteurs **attendent que les grands opérateurs télécom puissent « enfin prendre en charge ce service de façon à pouvoir disposer d'économie d'échelle sur les infrastructures et pouvoir enfin avoir des offres à un prix abordable pour tout un chacun. C'est une évolution des business models qui pourrait être attendue sur ce point ».**

Cas 6b || Télémétrie et Gestion de flotte de matériels agricoles ou robots

OBJECTIFS : S'assurer que les matériels sont utilisés de manière efficace et qu'ils sont bien entretenus (maintenance préventive et curative). Pouvoir géolocaliser les matériels. Suivre la consommation de ressources (carburants...) pour l'optimiser. Valoriser les données techniques pour optimiser les itinéraires techniques. Être capable d'intervenir en quasi-temps réel en cas de problème, voire ajuster les réglages machine (pression des pneus...). Cibles : agriculteurs, CUMA, groupements d'employeurs, coopératives + équipementiers...

DISPOSITIF : des capteurs positionnés sur le matériel (roue par exemple) communiquent (bluetooth, zigbee...) avec un dispositif (intégré au matériel ou boîtier ajouté) qui centralise les données captées et joue le rôle de passerelle entre le matériel et l'Internet mobile. Un GNSS permet la géolocalisation. Les données sont transférées sur un serveur où des algorithmes traitent les données pour en déduire l'activité de l'équipement, les trajets, la largeur de travail ainsi que la surface travaillée.



Figure 17 - @Karnott

BESOIN : 2 CAS :

- **Tracking matériel :** savoir à tout moment où est le matériel (suivi de bennes par exemple) => il s'agit de données légères mais qui doivent être collectées quasi en continu (par exemple toutes les 2 secondes) et en situation de mobilité.
- **Données de travail :** La connectivité mobile n'est pas obligatoire : si elle n'est pas possible, les données sont stockées localement puis récupérées et envoyées depuis un point fixe en fin de journée. Ces données de travail peuvent ensuite être croisées avec des cartes de sol, des images de télédétection et valorisées via un système d'information de gestion de l'exploitation, plateforme web (ouverte ou propriétaire) ou une application mobile. La criticité est liée :

- au **besoin de planification.** En général, l'utilisateur planifie les actions la veille (temp réel : 1 jour).
- au **besoin d'alerte** ou d'intervention sur le terrain : un délai de 15 mn, par exemple, peut rester raisonnable mais la remontée plus régulière permet de diminuer le volume de données sur chaque transfert.

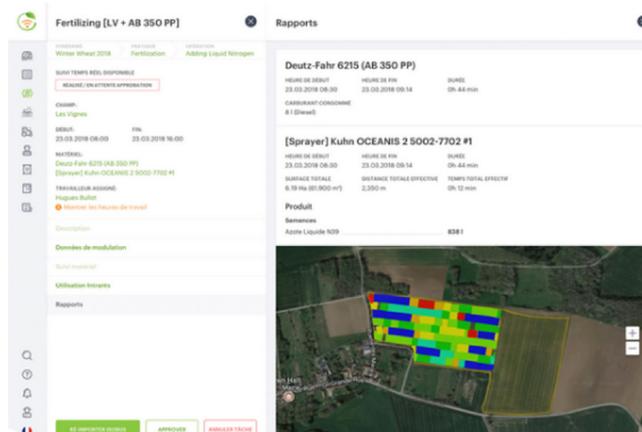


Figure 18- @MyEasyFarm

> Comment ce besoin est-il couvert aujourd'hui ?

Pour la simple remontée de donnée de travail (solution de type Karnott par exemple), les réseaux LPWAN peuvent répondre au besoin. Mais la mobilité et la fréquence des données collectées (notamment dans les cas de tracking) peuvent également orienter vers des solutions de type GSM : la 4G, voire la 3G, permettent déjà de répondre au besoin de façon très satisfaisante.

> La 5G changerait-t-elle réellement la donne pour ce type de besoins ?

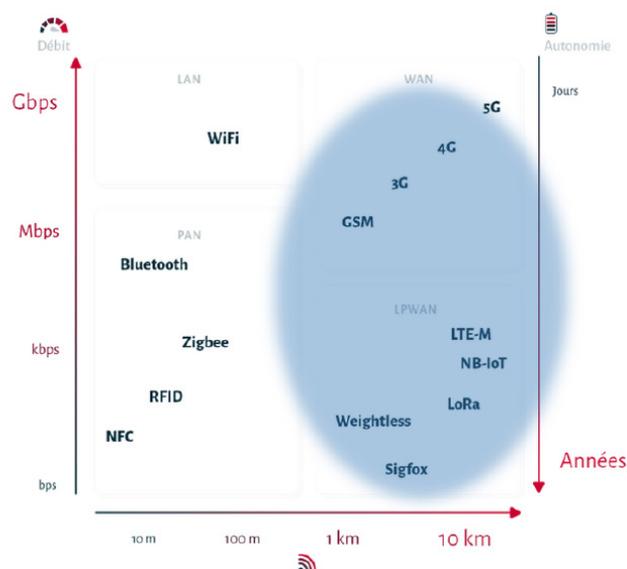
Le besoin premier de télémétrie peut largement être couvert par la 4G. **Si la 5G est disponible, c'est le développement des usages liés à la valorisation des données en temps réel qui peut être espéré.**

Par exemple, pouvoir envoyer en direct un flux vidéo pour permettre le suivi à distance des opérations réalisées (voir cas 6c, ci-après).

Il s'agit par ailleurs de pouvoir valoriser des communications descendantes, nécessitant, de façon ponctuelle, des volumes de données importants :

- Envoyer les données de missions sur la machine.
- Mettre à jour des terminaux à distance : besoin d'un gros débit, sans interruption.
- Récupérer en direct dans le tracteur les données traitées par les plateformes web (type MyEasyFarm, Climate Fieldview), notamment les cartes de préconisations pour la modulation.

Ces besoins sont actuellement bridés par la faible disponibilité et fiabilité des réseaux mobiles.



Pouvoir suivre les machines à distance est un gros enjeu. Pouvoir détecter à distance les problèmes, et même pouvoir intervenir à distance permet de gagner en productivité. On évite des déplacements inutiles. On économise du temps et du carburant. Mais si on lance une mise à jour logicielle à distance, on ne peut pas se permettre que ça plante au milieu du transfert.

Bruno Pierrefiche, Coordinateur Tracteurs et Nouvelles Technologies, CLAAS France

Aujourd'hui, on est capable de calculer des cartes de rendement mais il est difficile de visualiser en temps réel ce qui se passe à la parcelle. La technologie est bridée car on n'a pas la connectivité pour envoyer assez de paquets de données.

Tristan Guilbot, Business Manager France, The Climate Corporation

Au-delà de la 5G, l'enjeu actuel sur ce type de besoin est donc simplement d'avoir accès à la connectivité : c'est aujourd'hui l'un des freins essentiels à l'adoption de certains outils pour l'agriculture de précision. En cause notamment : les manipulations pour le transfert des données (passage d'un support à l'autre depuis une clé USB par exemple, lorsque les transferts automatiques ne peuvent être effectués) qui exigent du temps et des compétences informatiques.

Cas 6c II Du pilotage à distance à la robotisation (communications machine à machine)

OBJECTIFS : faire assurer à des systèmes télécommandés ou automatisés des tâches pénibles, chronophages, dangereuses ou posant des problématiques de recrutement de main d'œuvre.

DISPOSITIFS (EXEMPLES) :

- Engins agricoles pilotés à distance depuis un terminal
- Système robotisés supervisés à distance (avec possibilité de commande à distance lorsque l'intervention est plus délicate), comme des robots affectés à la récolte de fruits ou à la taille par exemple.
- Collaboration entre machines (robots en essaim par exemple, ou machines automatisées coordonnant leurs actions)

BESOIN : IOT CRITIQUE (URLLC)

- Temps réel : on est bien ici dans un «vrai» temps réel puisque les machines doivent pouvoir réagir immédiatement à une instruction. Latence <10 ms
- Fiabilité : maximale > 99,999 %
- Data : variable selon les cas. Le télépilotage peut exiger l'utilisation d'un flux vidéo 4K ou 8K.

On se situe ici sur un type de besoin en émergence (perspectives 3 à 10 ans).

> La 5G changerait-t-elle réellement la donne pour ce type de besoins ?

La capacité à recueillir des informations par télémétrie est déjà exploitée pour télécommander des tracteurs, par exemple pour nettoyer des parcelles (fougeraies et ronceraies) sur pentes abruptes. **La 3G ou la 4G suffisent alors pour obtenir ce type de fonctionnalités (19).**

Mais la 5G pourrait évidemment y apporter une autre dimension...

Ainsi, début 2020, la société finlandaise de télécommunications Elisa, en partenariat avec le fabricant de tracteurs Valtra, a transformé un tracteur de série en une « machine de travail télécommandée 5G »(20). Une **caméra 360°** est fixée sur le toit du tracteur offrant à l'opérateur à distance une vue de l'environnement en temps réel dans **des lunettes de réalité virtuelle**. Il peut examiner les alentours en tournant la tête. La 5G est alors nécessaire pour assurer le très haut débit requis par la vidéo 4K et permettre à l'opérateur de faire bouger les roues du tracteur sans latence, avec une vraie sensation de conduite. L'ensemble de contrôle à distance 5G (caméra à 360 degrés, un modem 5G et un câble à connexion Bus CAN) peut être monté sur n'importe quel tracteur Valtra récent avec des commandes entièrement électroniques.

Ce type de projets marque une nouvelle étape vers l'autonomie des engins mais ils semblent encore rares. D'une part, parce qu'ils ne correspondent pas forcément à une priorité métier et d'autre part, parce qu'il existe encore de nombreux verrous, qu'ils soient :

>>> Liés à la **conception par l'agriculteur de son métier** >>>>>

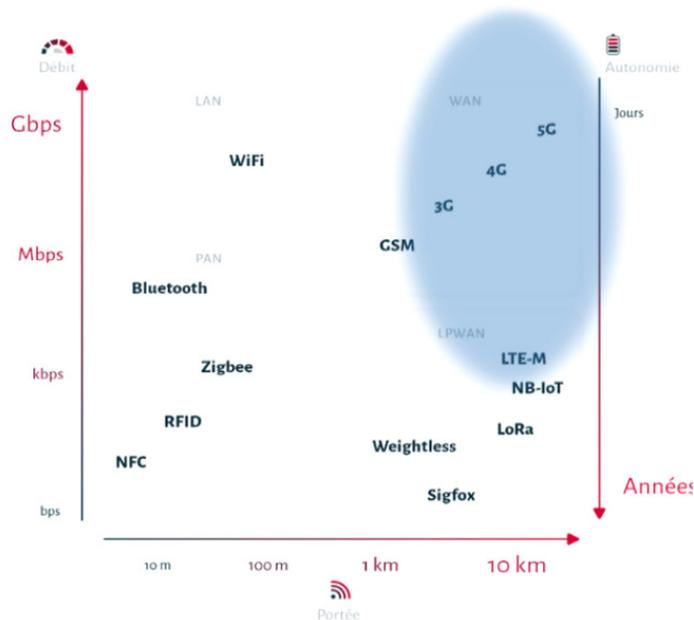


Figure 19 - @Valtra (valtrateam.valtra.com)

Les machines pilotées à distance on y croit puisqu'on travaille dessus mais cela suppose une évolution de la réglementation car actuellement, le lien télécom n'est pas suffisamment fiable pour se passer d'un opérateur à immédiate proximité. Aujourd'hui, ceux qui peuvent envisager ces fonctionnalités sont en Amérique du Nord ou en Australie, car les tailles des parcelles et la réglementation sont différentes. Par ailleurs, en Europe, le marché est peut-être plutôt celui de la «cobotique» avec pour but de décharger d'une certaine pénibilité et de risques directs pour les opérateurs. Mais l'agriculteur souhaite rester sur le terrain, au centre des opérations. C'est lui qui maîtrise la complexité des itinéraires techniques.

Colin Chaballier, General Manager, Exxact Robotics

>>> **Liés à des questions sociétales :** craintes sur le remplacement de l'homme par la machine et la délocalisation de la main d'œuvre .>>>>>>>>

On se prend à rêver au meilleur (dans un monde où la couverture du réseau serait totale). Moins de pénibilité avec par exemple des tailleuses de vignes télécommandées qui permettraient d'éviter de subir la pluie et les rigueurs de l'hiver en les pilotant tranquillement installé (voire confiné) à côté de son poêle avec une tasse de café. Moins de risque pour les opérateurs, lorsqu'il s'agit de broyer l'herbe ou de traiter des parcelles en forte pente. Réduction de la charge mentale du responsable de l'exploitation, puisqu'il devient possible de recruter des tractoristes (tant recherchés) même s'ils habitent loin de l'exploitation, dans les villes... Mais on imagine aussi les changements importants que cela pourrait susciter, avec la possibilité de sous-traiter la conduite des machines par des opérateurs situés à l'autre bout du monde.

Bruno Tisseyre, Professeur spécialiste de l'agriculture de précision, L'Institut Agro (Extrait d'un billet du blog AgroTIC, 28/05/20)

>>> **Liés à la réglementation et aux aspects juridiques :** machine détenue par X, systèmes informatiques et électroniques conçus par Y, télécontrôle effectué par Z : qui est responsable en cas d'accident ? >>>>>>>>>>>>

Développer des tracteurs sans conducteur, on peut tous le faire. La technique le permet. Mais on ne voit pas l'intérêt final dans une parcelle de 3 ha. La présence de l'humain reste importante quand on travaille à côté d'une autoroute ou d'une nationale. Le principal verrou aujourd'hui n'est pas technique : il est réglementaire !

Bruno Pierrefiche, Coordinateur Tracteurs et Nouvelles Technologies, CLAAS France

Pour la robotique agricole, l'arrivée de la 5G est également attendue pour résoudre certains des verrous actuels mais elle ne se fera pas sans régler au préalable des questions liées à la sécurisation des robots et au cadre réglementaire... (voir encadré).

Questions à **Stéphane Duran**, Responsable de projet, Robagri

Quels enjeux associez-vous à la 5G en matière de robotique agricole ?

Actuellement, l'enjeu «Sécurité de l'utilisation des robots» concentre l'essentiel des ressources des acteurs industriels et start-up de la robotique. La 5G est susceptible d'apporter des solutions :

- Dans le cas d'usage actuellement très marginal qui est l'autonomie complète du robot : en cas d'arrêt du robot, la 5G apporte la possibilité de diagnostiquer l'état de la machine, d'échanger en quasi temps réel et d'avoir la réaction appropriée.
- Dans le cas du contrôle commande des outils : ce type d'opération est très complexe. L'intelligence artificielle, en particulier l'apprentissage par renforcement⁴, est la voie privilégiée actuellement pour agir. Mais elle suppose des échanges de données très lourds. Ils devraient être permis par la 5G.

En revanche, la 5G peut potentiellement ouvrir vers d'éventuelles failles de sécurité (plus grande vulnérabilité au hacking). Dans ce cadre, il est probable que, dans un premier temps, les systèmes robotisés soient très fermés et sécurisés afin notamment de limiter les interactions avec des objets connectés. Le robot et les capteurs embarqués

sur les robots devront faire l'objet d'une analyse de risque en termes de cybersécurité. C'est un sujet d'intérêt de RobAgri notamment.

La précision du cadre juridique est également un enjeu. L'évolution actuelle de la Directive machine 2006/42 est un des préalables au développement d'une utilisation de la 5G pour la télémétrie (du guidage à distance) car elle devrait fournir un cadre juridique suffisamment précis et sûr pour envisager à moyen terme des scénarios d'autonomie partielle (niveau 4) puis totale, à plus longue échéance.

Les protocoles de communication sont également à affiner. Selon les zones, il va falloir compter sur différents types de couverture. D'autres protocoles de types ITS G5⁵ pourraient se développer dans certains cas d'usage, si la couverture est suffisante. Le secteur du véhicule autonome et des sociétés comme YOKOGO travaillent sur des approches hybrides en termes de protocole de communication.

A quels cas d'usage la 5G prépare-t-elle ? Les gros robots ou les flottes de petits robots ?

La sécurité et le cadre juridique seront les préalables au développement du scénario «gros robot». L'option de flotte de robots légers ou bien de tracteur maître conduit par un opérateur qui guide des esclaves robotisés est une voie médiane plus probable à court terme (cf Kubota). **Avant la définition d'un cadre juridique approprié, il est probable que le développement se fera d'abord sur des engins de taille limitée roulant à une vitesse réduite.**

⁴ L'apprentissage par renforcement est une méthode de machine learning consistant à **laisser l'algorithme apprendre de ses propres erreurs**. Si la machine se trompe, elle reçoit une pénalité. Si elle prend la bonne décision, elle reçoit une récompense. Le concepteur décide seulement les règles d'attribution des pénalités/récompenses mais c'est la machine qui petit à petit optimise son comportement pour accomplir la tâche qui lui est confiée. Cette méthode est aujourd'hui utilisée dans le cadre de la conception des véhicules autonomes.

⁵ ITS G5 : technologie dérivée du wifi, standardisée depuis de nombreuses années, qui opère dans la bande non licenciée 5,9 GHz.



Cas 7 : Utilisation du smartphone

Aujourd'hui, l'utilisation du smartphone est indissociable de l'activité professionnelle des agriculteurs.

Support de nombreux capteurs (caméra, microphone, antenne GNSS ou, pour les modèles plus avancés, thermomètre, hygromètre, caméra thermique...), le smartphone est probablement le premier objet connecté de l'exploitant. Il permet l'acquisition de données qui peuvent être stockées et traitées en interne mais aussi échangées ou envoyées sur des serveurs distants. Véritable outil d'aide à la décision, il permet l'accès à de multiples applications, des plus simples (consultation de données météo ou des cours sur les marchés) aux plus perfectionnées, utilisant par exemple la possibilité d'acquérir des images et de les traiter en temps réel : aide à l'identification de plantes et d'adventices, évaluation du couvert végétal, reconnaissance des maladies, identification et comptage d'insectes ravageurs, évaluation de la qualité de la pulvérisation par analyse de la photo d'un papier hydrosensible, estimation d'un nombre de fruits, ... Il est également l'outil indispensable pour partager de l'information directement depuis la parcelle, avec des pairs ou des conseillers, ou se former et s'informer via les réseaux sociaux.

> La 5G changerait-t-elle réellement la donne pour ce type de besoins ?

La plupart des usages «avancés» actuels sont conçus pour fonctionner de façon très satisfaisante avec un niveau de connectivité 4G. Bien qu'il s'agisse d'un usage professionnel, le bénéfice que pourra apporter la 5G sera probablement le même que pour le grand public : débits améliorés et latence réduite, possibilité d'utilisation d'applications utilisant des traitements temps réel (cloud computing ou edge cloud), capacité à exploiter de nouvelles solutions telles que la vidéo 360° ou la réalité virtuelle pour la formation, la télé-maintenance ou la télé-consultation vétérinaire... Les nouveaux usages agricoles se révéleront sans nul doute lorsque la 5G sera pleinement accessible.





On retient :

> L'Agriculture n'a pas attendu la 5G pour développer de nombreux usages basés sur les technologies de communications numériques. **Les réseaux LPWAN (Sigfox, LoRa) en particulier ont permis l'adoption de nombreux capteurs communiquant à bas débit** et constituent aujourd'hui le socle de l'agriculture de précision. D'autres solutions basées sur le satellite ont accompagné le développement d'usages liés à la modulation des intrants. Lorsqu'ils sont disponibles les réseaux 2G à 4G suffisent souvent pour assurer la connectivité de capteurs bas à moyen débit.

> Pour les objets communiquant à bas ou moyen débit, la 5G, au travers des technologies LTE-M et NB-IoT, se positionne plutôt comme une alternative, ou une évolution, notamment par rapport aux réseaux 2G et 3G appelés à disparaître. Elle pourrait permettre une généralisation des solutions, par **une plus grande capacité à répondre à différents besoins au travers d'un réseau unique**. Le bénéfice pourrait être l'accès à des sources de données plus larges, et une plus grande capacité à agréger des données multiples pour ajouter de la valeur et évoluer vers des outils d'aide à la décision plus performants.

> Mais **les réseaux LPWAN actuels ont encore de beaux jours devant eux** car ils permettent de mieux répondre aux problématiques de très basse consommation. Avant même de parler des atouts de la 5G, c'est la simple notion d'accès à la connectivité qui est en jeu.

La 5G devient synonyme de progrès réels dès lors qu'elle laisse entrevoir une réponse aux usages actuellement bridés tels que ceux impliquant l'échange d'images haute résolution ou des flux vidéo par exemple. Elle pourrait également lever différents verrous liés à la manipulation de fichiers, en permettant de récupérer directement sur la parcelle les cartes de préconisation et les données issues des systèmes de gestion d'exploitation (« Farm Management Information Systems »), actuellement en fort développement.

> La 5G ne constitue pas un indispensable pour accompagner les solutions basées sur le machine ou le deep learning. Les technologies de l'Edge Computing apportent déjà des réponses. En revanche, la 5G offre de **nouvelles opportunités liées notamment à l'Edge Cloud**.

> Le potentiel de la 5G est particulièrement attendu **pour toutes les problématiques liées au «vrai» temps réel** telles que l'automatisation des élevages ou la communication de machine à machine, qui exigent une très faible latence, un débit soutenu et une fiabilité totale. Ces caractéristiques ne peuvent pas être atteintes avec le réseau 4G.

> La 5G ouvre vers **de nouvelles possibilités de supervision globale de l'exploitation, où la connaissance d'information en temps réel permet l'intervention de l'exploitant** ou d'experts, éventuellement par le biais de télé-opérations.

> L'arrivée de la 5G va nécessairement bousculer la place de certains acteurs. Par sa généralisation, une plus grande facilité d'industrialisation des objets et de nouveaux modèles économiques pourraient être dégagés.

PARTIE 3 : ON Y CROIT OU PAS ?

3.1. Accès à internet et (Très) Haut Débit : la 5G arrivera-elle vraiment dans les campagnes ?

» 3.1.1 | AUJOURD'HUI, DE VRAIES INÉGALITÉS D'ACCÈS À L'INTERNET

La plupart des cas d'usage que nous venons d'aborder existent déjà bel et bien et l'agriculture est déjà un domaine «high-tech». **Les agriculteurs constituent d'ailleurs une population particulièrement connectée.**

L'étude Agrinautes 2019 réalisée par Hyltel-datagri pour Terre-net Média et France Agricole (21) auprès de 1100 agriculteurs révèle **que 85% des agriculteurs interrogés utilisent internet au moins une fois par jour et 99% d'entre eux au moins une fois par semaine.** L'analyse des plages et supports de connexion traduit deux usages :

- Un usage à la ferme, essentiellement sur ordinateur, en début et en fin de journée et à l'heure du déjeuner : les agriculteurs consultent les sites d'actualité agricole, accèdent à des vidéos de formation en streaming, échangent via les réseaux sociaux ou les plateformes collaboratives, accèdent aux services en ligne des administrations et des coopératives, effectuent des achats, vendent leurs produits ou encore gèrent l'exploitation via des applications agricoles en ligne.
- Un usage en mobilité, sur smartphone ou tablette, en matinée et l'après-midi. Sur le terrain, ils utilisent des applications mobiles, en particulier pour la météo ou le suivi des cultures. Ils peuvent également avoir besoin de télécharger des documentations de matériel.

Support privilégié des outils d'aide à la décision (83% des applications utilisées), le besoin d'internet en connectivité mobile grandit et pallie même la faiblesse de la connectivité fixe⁶.

Mais si l'utilisation du réseau mobile et le besoin de mobilité s'accroît, force est de constater que la qualité et la disponibilité des réseaux restent très inégales entre les exploitants.

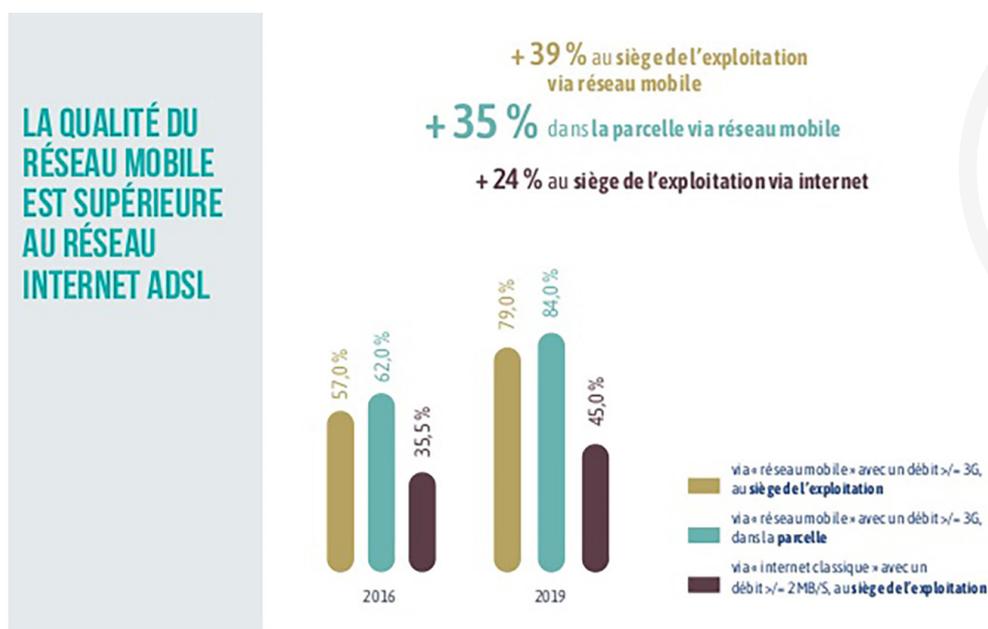


Figure 20 - Résultats de l'étude Agrinautes 2019 sur la couverture internet dont bénéficient les agriculteurs

⁶ Une enquête de l'UFC Que Choisir datée de 2019, indiquait un débit 2 à 5 fois plus faible en zone rurale qu'en ville sur l'internet fixe (9,1 Mb/s en ville en haut débit contre 5,2 Mb/s dans les villages) (22)

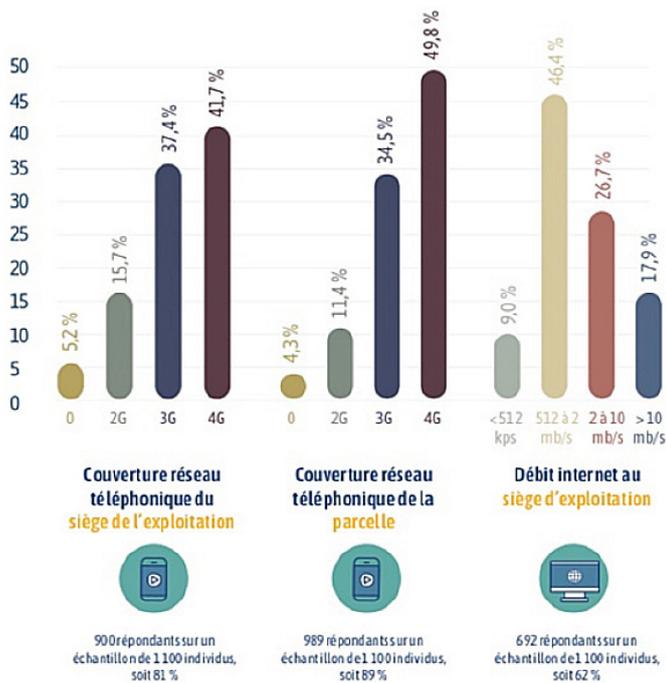


Figure 21 - Résultats de l'étude Agrinautes 2019 sur la couverture internet dont bénéficient les agriculteurs

Quand ils accèdent à Internet via les réseaux mobiles, presque la moitié des agriculteurs ne bénéficient encore que de couverture 2G ou 3G (d'après les chiffres de l'étude Agrinautes). Ils accèdent alors à des services de voix ou de transferts de données limités (de type sms). Nous l'avons vu : si, pour certains usages, tels que des capteurs de surveillance météo ou de surveillance du bétail par exemple, une connectivité 2G voire 3G peut être suffisante, la 4G est nécessaire pour les usages smartphone ou dès qu'il est question de transfert de données plus volumineuses (images ou vidéos par exemple) ...

Pour d'autres agriculteurs, situés dans ce que l'on appelle les « zones blanches »⁷ ou les « zone grises », la connectivité est une « galère du quotidien » qui bride les plus élémentaires des usages : pouvoir être joints par des clients, des fournisseurs, des conseillers et pouvoir disposer des services de dépannage pour lesquels il payent des abonnements (23).

Aujourd'hui, dans mes relations quotidiennes avec les agriculteurs, il existe une vraie segmentation entre ceux qui sont réellement connectés, facilement joignables grâce à un internet rapide, et les autres. On est obligé de s'adapter à ces deux types de population et de prévoir nos services en conséquence. On doit systématiquement penser à intervenir en déconnecté. Pour certains, pendant que la page de leur compte extranet de notre coopérative se charge, on a le temps d'aller boire un café ! Rien que télécharger des documentations ou des présentations un peu lourdes peut poser souci. On aimerait mettre à disposition des services d'images satellitaires mais pour certains, à moins de passer par des clés USB, ce n'est pas encore possible. Aujourd'hui, moi, ce que j'attends de l'évolution des réseaux mobiles c'est au moins la fin des zones blanches !

Baptiste Cuny, Responsable Innovation Services – Service Agronomique, Maisadour / Agralia

Pour la plupart de nos outils, nous sommes obligés de maintenir des gammes « en désynchronisé », pour pouvoir répondre aux besoins de ceux qui n'ont pas accès à une connectivité suffisante. C'est un frein car cela nous coûte cher et cela ne nous permet pas de proposer certains services du fait des possibilités de mises à jour limitées.

Alexandre Diaz, Responsable Innovation, Isagri

» 3.1.2 | AVEC LA 5G, PLUS HAUT DÉBIT PEUT-ÊTRE... MAIS PAS DE SOLUTION MIRACLE AUX ZONES BLANCHES

Comme nous l'avons vu dans la première partie de ce document, la révolution apportée par la 5G (MIMO massif et beamforming ...), va largement reposer sur les nouvelles bandes de fréquences, notamment celles des ondes millimétriques. **Or les ondes millimétriques, nécessitant un maillage plus serré des antennes, sont peu favorables aux grandes zones géographiques peu densément peuplées.** Pour les entreprises agricoles qui seront dans ces zones (loin des grands axes routiers ou des zones d'activités), la 5G passera probablement par les fréquences inférieures à 6 GHz voire les bandes de fréquences <1Gz, telle celle des

⁷ Une zone blanche est une zone non couverte par les réseaux de téléphonie mobile. Il y est impossible d'émettre ou de recevoir des appels, de partager des données ou de se connecter à internet, quel que soit son opérateur mobile. Une zone grise est une zone qui est couverte par au moins un opérateur mobile, mais pas par tous

700 MHz qui correspond à des ondes de longue portée. Cette bande étant déjà utilisée par les réseaux actuels, **on peut s'attendre à ce que les sites existants puissent en bénéficier, par le biais de mises à jour permettant de profiter des nouvelles technologies de transmission.**

Ceci signifie en revanche que, **dans ces zones, il est peu probable d'atteindre les performances maximales de Ultra Haut Débit promises par la 5G (du moins pas avant longtemps).** Seul un couplage entre la bande 3,5 GHz (pour la capacité) et la bande 700 (pour la couverture, y compris en intérieur) pourrait véritablement amener un gap significatif entre 4G et 5G dans les zones rurales.

Cela ne signifie pas pour autant qu'il n'y aura pas de gain. Quelle que soit la bande de fréquences, le débit devrait être plus important en 5G qu'en 4G, du fait d'un codage plus efficace. En bande basse fréquence, des largeurs de bande de 30 MHz peuvent être obtenues grâce aux nouvelles techniques de transmission (agrégation de porteuses) vues plus haut... (24). Sur son site Internet, l'Arcep indique ainsi qu'une «cellule rurale» (en fréquences 700 Mhz) peu chargée en nombre d'utilisateurs, peut offrir un meilleur débit qu'une «cellule urbaine» (en fréquence 3.5 GHz) très chargée. Le graphique est cependant assez parlant à charge égale...

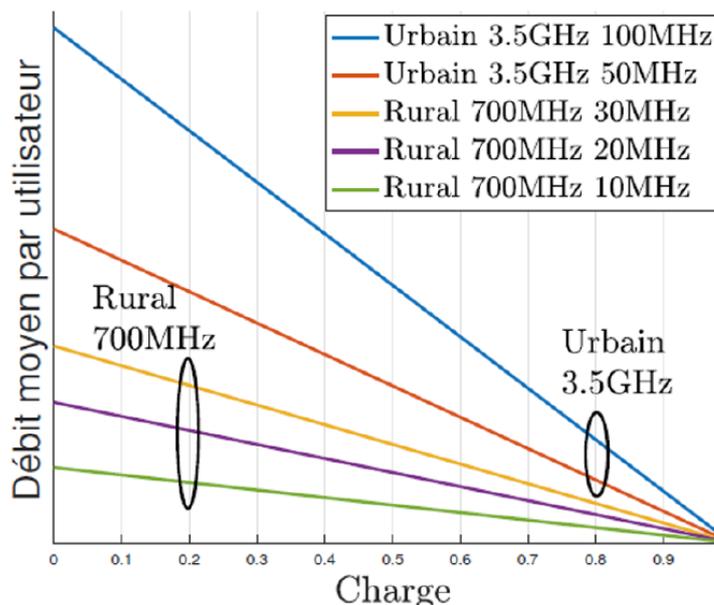


Figure 22 - Déploiement en zones rurales et urbaines : influence de la Charge. Source : Arcep, Présentation de Marceau Coupechoux, sept. 2020

Les obligations assignées aux opérateurs pour le « Très Haut débit mobile » dans les zones peu denses concernent les bandes 700 et 800 MHz : ci-dessous. L'Arcep sera chargée de vérifier le respect de ces obligations.

THD mobile ¹	17 janv. 2022	17 janv. 2027	8 dec. 2030	
Bande liée à l'obligation ²	700 MHz 800 MHz	700 MHz 800 MHz	700 MHz	<p>1 - THD mobile : Très haut débit mobile.</p> <p>2 -Bande liée à l'obligation : le titulaire de la bande peut également réaliser son obligation de couverture en utilisant d'autres fréquences dont il est titulaire.</p> <p>3 - obligation à remplir dans la bande considérée uniquement pour la zone de déploiement prioritaire</p> <p>4 - obligation qui ne figure pas dans les autorisations mais qui résulte mécaniquement de l'obligation de couvrir 99,6 % de la population métropolitaine.</p>
Zone de déploiement prioritaire ³ (18 % de pop et 63 % du territoire)	90 % de la population (800 MHz)	97,7 % ⁴ de la population (800 MHz)	97,7 % de la population	
Opérateurs	Bouygues Telecom Free Telecom (hors 800 MHz) Orange SFR	Bouygues Telecom Free Telecom (hors 800 MHz) Orange SFR	Bouygues Telecom Free Telecom Orange SFR	

Figure 23 - Les obligations de couverture des opérateurs en zones peu denses pour le très haut débit mobile. Source : Arcep (arcep.fr)

Notons que l'Arcep définit un accès internet « haut débit » lorsqu'il permet d'offrir un débit inférieur à 30 Mb/s (et a priori supérieur à 2Mb/s) et un accès internet « très haut débit » lorsqu'il permet d'offrir un débit supérieur à 30 Mb/s.

Cependant, pour ce qui est de l'installation de nouvelles antennes (au sens création de nouveaux sites), il est peu probable que les zones peu denses présentent une rentabilité suffisante pour que les opérateurs en fassent une priorité. D'ailleurs Orange est assez transparent sur le sujet et affiche sur son site internet : «En matière de déploiement, ce sont d'abord les endroits où notre réseau 4G est déjà très fortement sollicité

qui seront priorités afin de répondre aux besoins du public».

A priori, il ne faut donc pas attendre de la 5G qu'elle réponde à la problématique des zones blanches.

Rien n'empêche cependant d'imaginer que des dispositifs soient implantés localement (un point central alimenté par voie radio ou fibre optique ou satellite) et des relais dispersés sur quelques kilomètres autour. Mais les initiatives de ce genre dépendront plus de la volonté des collectivités territoriales (ou de très grandes entreprises du secteur agricole ou agro-alimentaire qui auraient déployé un réseau privé) que de celles des opérateurs.

» 3.1.2 | UNE SITUATION QUI DEVRAIT QUAND MÊME GLOBALEMENT S'AMÉLIORER (VIA LA 4G !)

La situation de « connectivité générale » devrait quand même s'améliorer sous l'effet du « **New Deal Mobile** », un accord passé entre l'état et les opérateurs de réseaux mobiles (avec engagement juridique de ceux-ci) pour améliorer « la couverture de zones dans lesquelles un besoin d'aménagement numérique du territoire a été identifié par les collectivités et le gouvernement ». Ainsi, chaque opérateur devra assurer la couverture en **accès mobile haut débit (via la 4G)** de 5 000 nouvelles zones grâce à de nouveaux sites dont certains seront mutualisés.

Par ailleurs, l'État a lancé le plan « France Très Haut Débit » qui prévoit le haut débit pour tous, principalement via la fibre, à l'horizon 2025 ou 2030. « Pour permettre la généralisation du déploiement de la fibre optique dans les 25 départements restants, l'État a décidé de débloquer 280 millions d'euros de financements supplémentaires, en appui aux collectivités territoriales » (gouvernement.fr)

A terme, c'est donc un ensemble de solutions de connectivité (Très) Haut Débit qui devrait progressivement apporter une réponse à la problématique des zones blanches, tant en fixe qu'en mobile. Outre la fibre et les réseaux mobiles, une troisième voie pourrait également apporter des perspectives intéressantes : la connectivité par satellite. Voir encadré.

En complément de la Fibre et de la 5G, le satellite pourrait offrir une autre voie d'accès vers le Très Haut Débit dans les zones très faiblement peuplées (25)

Si le déploiement du réseau mobile 5G et de la Fibre dans les zones très faiblement peuplées semble encore lointain du fait de la complexité de déploiement et des investissements massifs à consentir par les opérateurs, de nouveaux projets de connectivité par satellites semblent offrir des solutions crédibles, en complément des réseaux terrestres. 2 voies sont envisagées :

> LES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES (GEO).

En orbite à 36000 km de la Terre, ces satellites se déplacent de façon synchrone avec elle, restant constamment au-dessus du même point de la surface. Orange promet de pouvoir proposer à ses clients, « même ceux vivants dans les zones isolées », un très haut débit fixe (au moins 30 Mb/s) par satellite GEO d'ici 2022. Distribué par sa filiale Nordnet, le service s'appuiera sur le satellite Eutelsat Konnect.

AVANTAGE : le coût d'équipement devrait être supportable grâce à un modèle industriel compétitif.

INCONVÉNIENT : les satellites étant situés loin de la Terre, le problème de latence ne pourra être résolu de façon efficace et ne permettra pas d'accompagner le développement

de certains usages (temps réel strict, jeux exigeants, visio-conférence confortables...).

> LES SATELLITES EN ORBITE BASSE (OU LEO),

des petits satellites envoyés en orbite à une altitude entre 640 à 1120 km, et qui tournent rapidement autour de la Terre. La continuité du service depuis le sol est assurée par le transfert de la connexion d'un satellite à l'autre. Leur faible poids permettant de réduire les coûts de mise en orbite, ils peuvent être déployés en nombre et ainsi couvrir l'intégralité du globe.

AVANTAGE : Cette nouvelle technologie satellite promet des performances d'usage proches de la fibre et une latence faible (moins de 20 ms) du fait de la proximité avec la Terre. Ils nécessitent de

petites antennes et peuvent ainsi équiper des petits terminaux, comme des smartphones ou autres objets connectés. Ils constituent ainsi une vraie opportunité pour l'IoT, pour couvrir de larges zones (env. 2800 km de rayon) peu peuplées ou difficiles d'accès. Une vingtaine de projets ont déjà vu le jour, parmi lesquels la constellation SpaceX de Starlink (créée par Elon Musk), ainsi qu'une initiative européenne (pour disposer d'une constellation indépendante des grandes entreprises américaines).

INCONVÉNIENT : Encore émergentes, ces technologies posent encore différents défis techniques (et des questions d'occupation de l'Espace) et le coût en reste important.



3.2. La 5G, c'est pour quand ?

Nous avons vu dans la partie précédente, les promesses de la 5G correspondant aux éléments décrits par le 3GPP, au rythme des "releases", c'est-à-dire des versions successives du standard prenant en compte de nouvelles fonctionnalités. La 5G est «en chantier» depuis la release 15. Depuis juillet 2020, la release 16 est finalisée. Les releases 17 et probablement 18 continueront à préciser les modalités retenues. Cependant, et en tout cas pour la France, le déploiement de la 5G reste encore pour l'essentiel au stade du prévisionnel. Même si les opérateurs proposent déjà les premières offres 5G, du temps va encore être nécessaire pour passer de la norme à la mise en œuvre effective et complète...

>> NE SOYONS PAS TROP PRESSÉS...

D'abord une simple évolution

Depuis la release 15, il est clairement établi que la 5G se place dans un premier temps comme une « simple » mise à jour technologique de la 4G LTE. Grâce aux nouvelles gammes de fréquences ouvertes (la bande des 3,5-3,8 GHz) couplées aux premières antennes 5G déployées, les utilisateurs pourront **bénéficier d'un débit et d'une latence améliorés par rapport à la 4G, sans toutefois atteindre les performances maximales annoncées**. En effet, dans un premier temps, le cœur de réseau restera largement basé sur un cœur de réseau 4G.

Pour rappel, l'architecture classique d'un réseau mobile est constituée de 2 parties : un réseau d'accès radio et un cœur de réseau. Habituellement, un réseau d'accès fonctionne avec un cœur de réseau de la même génération. Or, pour la 5G, il a été prévu très tôt que le réseau d'accès radioélectrique 5G puisse prendre en charge 2 modes :

- **le mode autonome (SA ou Stand Alone)** : le réseau d'accès 5G NR se raccorde au cœur du réseau 5GC (5G Core Network), indépendamment des autres réseaux. C'est la « vraie 5G » qui doit permettre de bénéficier du maximum des avancées technologiques mais qui nécessite de profonds aménagements.

- **le mode non autonome (NSA ou Non Stand Alone)** : ce mode s'appuie sur le réseau 4G existant. Le réseau radio 5G se raccorde au cœur du réseau 4G (appelé EPC) et combine les ressources radio 4G LTE ou 5G NR selon les besoins et les conditions.

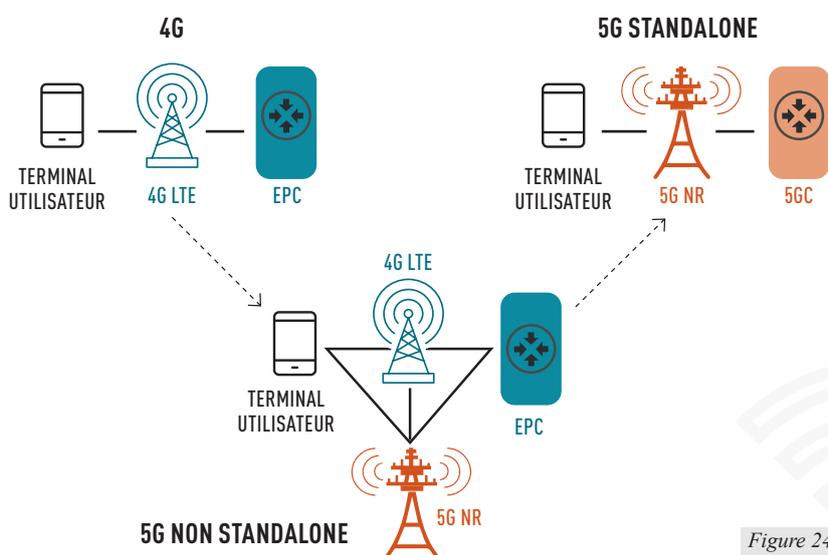


Figure 24 - Evolution de la 5G NSA vers la 5G SA

Depuis les premiers déploiements de la 5G, c'est le mode NSA qui prévaut, **donc en réalité plutôt une 4G LTE +**. Ce type de déploiement a été choisi car il permet de répondre très rapidement au besoin de débit tout en limitant (ou en étalant) l'effort d'investissement pour les opérateurs (qui ont déjà de gros chantiers engagés pour le déploiement de la fibre).

L'intégration des ondes millimétriques, l'installation des antennes 5G et des centres de gestion de réseau va se faire très progressivement. **La « vraie » 5G n'est pas annoncée avant au mieux 2023 (d'après Orange)**.

Puis une progression sur les 10 années à venir

>> Ce fonctionnement est, pour une part, très classique : à chaque nouvelle génération de réseau mobile, les déploiements se font progressivement, pour des raisons d'échelonnement des investissements et d'adaptation à la demande. Dans un premier temps, les opérateurs vont compléter les équipements sur les sites existants, faire des mises à jour logicielles. Petit à petit, ils déploieront les nouvelles infrastructures, voire des nouveaux sites en réaffectant les budgets de développement de la 4G sur la 5G. Le scénario eMBB sera probablement privilégié puis les deux autres seront rendus possibles.

Ce déploiement pourrait être d'autant plus lent que certaines craintes liées à l'utilisation de nouvelles gammes d'ondes et leur possible effet sur la santé, à la surconsommation énergétique et au risque d'impact environnemental (26), incitent aujourd'hui certains élus à déclarer des moratoires sur la 5G. Le frein sociétal risque de jouer un rôle important, notamment en France.

>> Pour une autre part, la progressivité du déploiement de la 5G sera directement liée aux ambitions qui lui sont associées : **organiser la convergence des technologies.**

Il s'agit par exemple de faire converger les technologies classiques d'accès des réseaux mobiles, en assurant la cohabitation de différents réseaux, avec celles de l'IoT. Ceci suppose la mise en œuvre de nouveaux protocoles, l'intégration de nouveaux dispositifs pour assurer l'intégrité et la sécurité des systèmes... Il s'agit aussi de faire converger les technologies de télécommunication avec celles de systèmes d'information pour la virtualisation des réseaux et l'Edge computing, en essayant de limiter la facture énergétique. Cela peut passer par de nouvelles stratégies de positionnement pour les opérateurs, de nouveaux partenariats (avec des équipementiers ou d'autres opérateurs par exemple) et donc des nouveaux modèles économiques. Les opérateurs pourraient par exemple se placer plus en fournisseurs de services à la demande qu'en fournisseurs d'infrastructure globale.

Il s'agit également de laisser se développer les usages et mûrir les technologies sur lesquelles ils s'appuient (l'intelligence artificielle par exemple).

C'est donc tout un écosystème qui est en construction, au-delà même de la mise en place des réseaux.

Tout ceci ne se fera pas rapidement et bien des étapes sont encore à franchir pour que les promesses de la 5G soient tenues...

>> D'après une étude réalisée par l'équipementier Ericsson en Novembre 2020 (27), la 5G pourrait représenter 40% du nombre total d'abonnements mobiles d'ici fin 2026, soit environ 3,5 milliards d'abonnements. Le LTE resterait cependant majoritaire sur la période : pic en 2021, avec 4,8 milliards d'abonnements, avant de baisser à 3,9 milliards d'ici la fin de 2026. L'étude mise sur 68% d'abonnements 5G en Europe de l'Ouest fin 2026 (80% pour l'Amérique du Nord et 66% pour l'Asie du Nord Est).

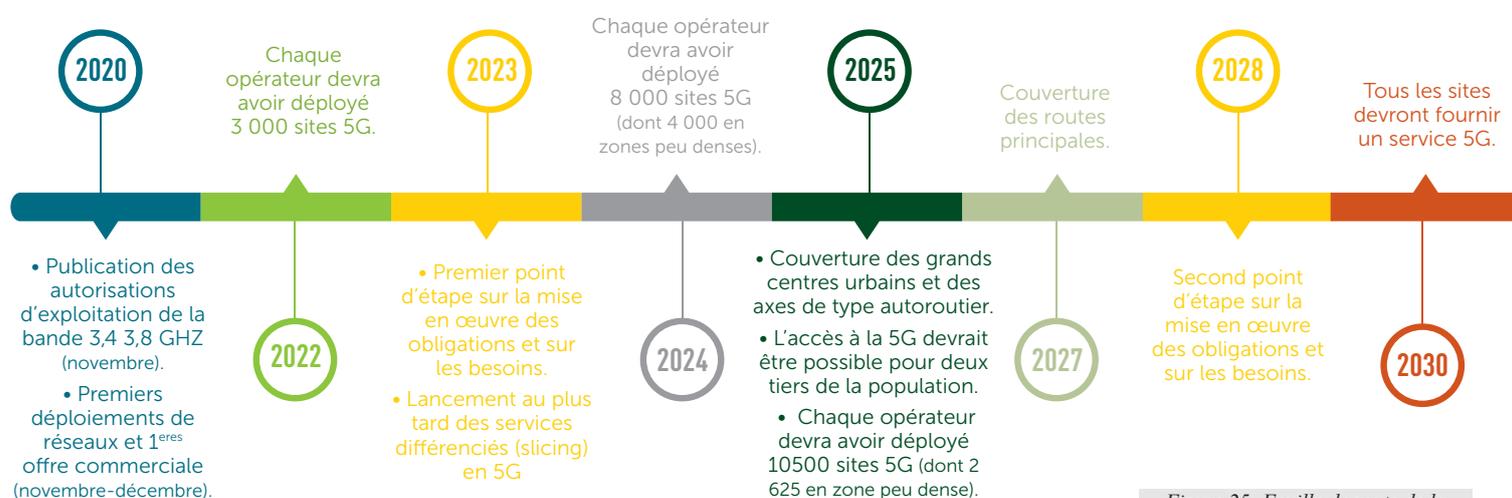


Figure 25- Feuille de route de la 5G en France. Source : vu dans Numerama.com

>> SANS ÊTRE PRESSÉS, DOIT-ON CRAINDRE UN RETARD ?

En France, le coup d'envoi de la 5G a véritablement été lancé en Novembre 2020 avec l'attribution des fréquences de la bande 3,5 GHz, soit avec un certain retard par rapport à d'autres pays dans le monde et notamment nos voisins européens.

La Corée du Sud a pris une longueur d'avance en étant le premier pays au monde à lancer des services 5G et comptait 7,8 millions d'utilisateurs de la connectivité 5G en juillet 2020, soit environ 15 % de la population. La Chine a également fait un lancement missile et comptait déjà 100 millions de terminaux en septembre. En Europe, 14 pays proposent des offres 5G depuis 2018 ou 2019 : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, l'Espagne, la Finlande, la Hongrie, l'Irlande, l'Italie, la Lettonie, les Pays-Bas, la Pologne, la Roumanie, la Suède et le Royaume-Uni. (28) **Les pays les plus en avance sont ceux où les équipementiers sont les plus puissants, Nokia et Ericsson en Europe, Huawei en Chine.**

Le retard est expliqué par différents facteurs. Côté régulation : une priorité donnée à la consolidation des bases de la réglementation générale des réseaux mobiles français (dans le cadre du New Deal Mobile par exemple). Côté gouvernance : un temps supplémentaire de réflexion sur les choix de positionnement nationaux vis-à-vis des 3 équipementiers susceptibles de développer les réseaux de distribution de la 5G (Nokia, Ericsson, Huawei) afin de ne pas placer la France en situation de risque en matière de sécurité des données (risque d'espionnage ou autres). Enfin, la crise de la Covid19 a également décalé les échéances d'attribution des fréquences.

Le principal enjeu d'un retard serait que les usages liés à la connectivité 5G se développent ailleurs et donc que la valeur associée à la proposition de services se développe chez nos voisins.

Dans un rapport adressé par le collège d'experts aux ministres de l'Economie et des Finances et de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'innovation, en février 2020 (29), **le développement de l'agriculture de précision et des agro-équipements est présenté comme l'un des marchés émergents à fort enjeu de compétitivité** ; un marché sur lequel la «France est en capacité de se positionner en leader» du fait de ses atouts (efficacité de la recherche, tissu d'acteurs de l'innovation...), pour relever le «défi d'une alimentation saine et durable» et de l'agroécologie. Parmi les verrous identifiés pour atteindre cet objectif sont notamment cités le fait que «les entreprises françaises peinent à se développer face aux grandes entreprises souvent internationales» et «la confidentialité de la recherche de nouvelles solutions techniques liée au faible nombre d'agriculteurs concernés».

Un retard significatif en matière de connectivité 5G pourrait donc être d'autant plus dommageable, vis-à-vis de cet objectif de compétitivité et de souveraineté du secteur agricole français.

D'après l'Arcep, cependant, «la 5G en est à ses débuts et la France n'est pas vraiment en retard». D'autres experts indiquent que l'avance prise par les autres pays n'est que relative dans la mesure où les premiers retours des consommateurs, déçus par le faible écart de performances avec la 4G et les dysfonctionnements liés à la cohabitation entre les réseaux, sont parfois défavorables et que du point de vue des opérateurs, ni la technologie ni les modèles économiques ne sont encore matures.(30)



3.3. Comment s'y préparer ?

» 3.3.1 | UNE ATTENTE PRAGMATIQUE DES ACTEURS DE L'AGTECH

Si le potentiel de la 5G ne laisse pas froids les acteurs de l'Agtech, il n'en reste pas moins que les promesses non tenues quant à l'accès à la connectivité Haut débit et le caractère relativement erratique du déploiement de la 4G dans les campagnes les laissent dans **une posture « wait and see »**. Ci-dessous, quelques points de vue exprimés lors de nos échanges :

Les espérances sont là... Mais nous sommes très dépendants des plans de déploiement des opérateurs. Pour l'IoT, le déploiement s'est fait de façon très progressive. Il y a une certaine inertie, que nous subissons. Nous devons malgré tout travailler ensemble et il faut que chaque partie appréhende les opportunités de marché. D'après moi, la 5G commencera à être une réalité pour la R&D d'ici 3 ans mais le marché sera concerné seulement dans 10 ans...

Colin Chaballier, Exxact Robotics

Pour le moment, pour une petite entreprise comme la nôtre, il est très difficile de se projeter à cause des ralentissements liés aux moratoires et aux craintes diverses suscitées par la 5G. Pour l'instant, on reste prudents et attentifs aux évolutions sur ce sujet. En 5G, dans un premier temps, il s'agira probablement de la « techno push », poussée par les opérateurs et les industries des composants. Quand la 5G sera « banalisée » auprès du grand public alors ce sera plus facile. De nouveaux cas d'usage pourront apparaître. Il faut attendre que ce soit plus mature...

Viktor Toldov, Lituus

La 5G est une norme. Son implémentation et ses fonctionnalités seront longues à être développées. [...] La technologie n'est qu'à ses balbutiements. Actuellement, il s'agit de coups de communication des opérateurs et fabricants de terminaux mobiles. La vraie 5G n'existera pas sur une grande majorité du territoire Français avant 2023. [...] de notre côté, nous attendons de disposer d'un module 5G pour pouvoir vérifier que notre boîtier est déjà compatible. Nous sommes agnostiques aux technologies de communication, la 5G sera une nouvelle interface de communication pour notre équipement, et nous développerons des services quand le matériel sera disponible et que les coûts d'abonnement (Forfait) seront raisonnables. Sinon nous resterons en 4G

Gwenaël Le Lay, Copeeks

» 3.3.2 | POURSUIVRE LES EFFORTS DE STRUCTURATION

Les acteurs de l'AgTech restent pour le moment prudents quant à la réalité de la 5G pour le secteur agricole. Pour autant, quelques pistes peuvent être évoquées pour s'y préparer :

»» UNE STRUCTURATION EN « VERTICALE »

Dans un document publié en 2017 dédié au marché de la Smart Agriculture (31), Huawei mettait en avant le rôle que pouvait avoir les opérateurs : «La majorité des opérateurs de télécommunications offrent principalement des services de connectivité, mais la connectivité ne représente qu'une petite partie du revenu total. À l'avenir, les opérateurs de téléphonie mobile pourront fournir des services de bout en bout afin de générer une nouvelle croissance des revenus. D'ici 2020, le marché total adressable pour les opérateurs de télécommunications dans le secteur agricole s'élève à 12,9 milliards de dollars US du point de vue de l'intégration verticale, du partenariat et du marketing, et des services à valeur ajoutée. Les opérateurs devraient tirer d'immenses avantages d'une coopération accrue avec les fournisseurs de services à valeur ajoutée». De ce point de vue, **notre capacité à nous structurer et à œuvrer à l'échelle nationale et européenne dans un cadre de co-construction avec les opérateurs pourra être un atout pour développer un écosystème 5G favorable et adapté au secteur agricole.**

Par ailleurs, dans le cadre du plan de relance, l'État souhaite «soutenir les meilleurs projets de R&D, d'investissements et de mise en œuvre **de projets d'expérimentation basés sur la technologie 5G en vue d'accélérer les applications aux marchés verticaux.** Il s'agit de développer des produits et services novateurs pour les filières d'avenir garantissant la création de valeur en France, par exemple dans les services publics [...].

l'automobile, le service ferroviaire, [...], **l'agriculture** ou l'industrie ». Un appel à projet a ainsi été relayé par BPI France et reste ouvert jusqu'au 1er Juin 2021. « Les porteurs de projets devront s'engager à développer des applications en priorité pour l'industrie française et européenne, ainsi qu'à permettre à d'autres acteurs, notamment PME et start-ups, un accès raisonnable au projet d'expérimentation ».

>> UNE VIGILANCE RENFORCÉE SUR LES SYSTÈMES D'INFORMATION

Même pour ceux qui ne planifient pas des projets 5G avant longtemps, il convient d'anticiper les changements technologiques à venir :

- Changement de paradigmes dans la façon de gérer les réseaux, avec une arrivée possible de nouveaux acteurs dans le secteur des télécoms appelant **à une bonne vision, voire un audit, de ses propres infrastructures,**
- Explosion de la quantité de données, **nouvelles stratégies en lien avec le Edge ou le Cloud Computing,** appelant à anticiper un éventuel recours à des partenaires pour mettre en place ces services
- Vigilance accrue par rapport à la **sécurisation des systèmes** : si la 5G favorise le partage et l'agrégation de données multiples, encourage le développement de plateformes globalisées (éventuellement détenues par des entreprises étrangères), la sécurité des données est plus que jamais un enjeu. **La poursuite des efforts autour de la RGPD et de la gestion des consentements est un axe prioritaire, qui peut là encore être conduit dans une approche « verticale ».**

>> POURSUIVRE LA REFLEXION SUR L'IMPACT DU NUMERIQUE

Comme vu précédemment, il existe encore une large incertitude sur quand et comment la 5G concernera le secteur agricole. Les stratégies de déploiement des opérateurs ne sont encore pas totalement connues et la façon dont les usages évolueront ou dont la 5G sera adoptée relèvent encore d'hypothèses. D'autant que, comme nous l'avons vu, sa plus-value ne semble pas toujours évidente pour nombre de cas d'usages agricoles (existants). Pour autant, puisque nous parlons ici de se préparer au déploiement de la 5G, **il semble important d'évoquer les craintes et la nécessaire réflexion à mener quant à son impact, notamment sur le plan environnemental.** Le secteur agricole est en effet directement concerné par les problématiques de dérèglement climatique (en lien avec l'émission de gaz à effet de serre).

Des groupes de réflexion tels que *The Shift Project* alertent sur le fait que le numérique émet (en 2019) « 4 % des gaz à effet de serre du monde et sa consommation énergétique s'accroît de 9 % par an » (pratiquement autant pour ce qui concerne l'usage du numérique que pour la production des équipements : terminaux, infrastructures réseaux...). Par ailleurs, si la 5G promet une meilleure efficacité énergétique, on peut craindre que ceci ne soit contrebalancé par un usage accru des outils, comme le signalait l'Arcep en 2019 dans sa note sur l'empreinte carbone du numérique (32). C'est le fameux *effet rebond* : l'utilisation très augmentée d'une nouvelle technologie plus économe conduit finalement à une consommation supérieure. Dans son rapport de Décembre 2020 (33), le Haut Conseil pour le Climat, organisme indépendant, évoque différents scénarios de déploiement de la 5G et indique que « l'empreinte carbone du numérique pourrait se voir accrue en 2030 toutes choses égales par ailleurs de 2,7 Mt éqCO₂ dans l'évaluation basse à 6,7 Mt éqCO₂ dans l'évaluation haute » (par rapport à une empreinte carbone du numérique évaluée à environ 15,1 Mt éqCO₂ en 2020).

L'analyse de cet impact est complexe car dans la projection, il faut également tenir compte d'éventuelles substitutions d'usages par d'autres... **Néanmoins, la question invite dès à présent à une réflexion, entre acteurs du numérique agricole et au-delà,** sur des sujets tels que la priorisation des développements technologiques, les bonnes pratiques pour la conception des solutions (et des équipements), la sobriété numérique ou l'information et la sensibilisation sur les impacts des usages des outils numériques.

CONCLUSION



Annoncée à grand bruit, la 5ème génération de réseaux mobiles a été pensée à la fois pour répondre aux besoins croissants du grand public en termes de trafic de données, en évitant la saturation des réseaux, et pour être le support de la digitalisation de toute l'économie. Si des controverses existent sur l'effet des ondes sur la santé, la consommation énergétique des réseaux ou la confidentialité des échanges et la sécurité des données, les potentialités de la 5G n'en restent pas moins un sujet digne d'intérêt.

En capitalisant les avancées des 10 dernières années en matière de télécommunications, la 5G sera d'abord un prolongement de la 4G, puis, progressivement, les innovations télécom devraient rejoindre d'autres domaines technologiques (intelligence artificielle, edge computing...) et ouvrir la voie à de nouveaux usages. Automatisation des industries, suivi et opérations à distance grâce aux possibilités de la vidéo 360° et de la réalité augmentée, villes "intelligentes" ... Les promesses sont multiples pour tous les secteurs d'activité et l'essentiel des services est probablement encore à inventer.

Pour ce qui concerne l'Agriculture, l'enjeu de la connectivité devient crucial à l'heure où le smartphone est un outil majeur de l'agriculteur au quotidien et où les objets connectés se font de plus en plus présents sur les exploitations. Mais jusque-là, force est de constater que les zones rurales, en France comme ailleurs, ont souvent été défavorisées pour l'accès aux réseaux mobiles. Jugé peu rentable par les opérateurs, leur déploiement dans ces zones n'a pas été prioritaire. Sous l'impulsion de l'Etat et la supervision des organismes régulateurs des télécommunications, la situation devrait s'améliorer dans les années futures, notamment grâce au New deal Mobile. **Même s'il s'agira probablement d'abord de finaliser le déploiement de la 4G, cela devrait permettre de débrider beaucoup des usages actuels.**

Au travers de l'intégration des technologies LTE-M et NB-IoT, la 5G pourra proposer des solutions pour des besoins "moyen débit/consommation modérée" lorsque les réseaux 2G ou 3G seront abandonnés. Quant aux bénéfices de la "vraie" 5G, ils sont particulièrement espérés pour tout ce qui concerne "l'internet des objets critique", où il existe un enjeu de "vrai temps réel", de totale fiabilité et de débit de données soutenu : l'automatisation des élevages, la robotisation, les télé-opérations ...

Si la 5G et les usages qu'elle permettra de développer constituent un enjeu de compétitivité nationale et européenne, aujourd'hui, avouons-le, de très nombreux points d'interrogation demeurent sur la concrétisation de toutes ces promesses. D'un point de vue technologique, toutes les spécifications ne sont pas encore connues et les déploiements n'en sont encore qu'à leurs balbutiements. Il faudra encore 2 à 5 ans pour commencer à toucher du doigt le potentiel de la 5G, y compris en ville. Un stade supérieur de maturité doit également être atteint en termes de construction de tout l'écosystème 5G et de développement des modèles économiques... De ce fait, il n'y a pas "une 5G" mais "des 5G" ; **il conviendra donc de prendre les annonces et les cartes de déploiement de la 5G avec précaution.**

Même après un certain temps à étudier le sujet, le doute n'est pas levé sur la capacité effective des opérateurs (ou des collectivités territoriales) à faire effectivement arriver la 5G en moins de 10 ans jusqu'à une majorité d'agriculteurs. Mais les acteurs du secteur agricole ont déjà montré leur capacité à s'adapter et à innover : ils saisiront les opportunités quand elles se présenteront mais ils n'attendent pas la 5G pour continuer à progresser. **Le travail de structuration en «verticale», la coopération entre acteurs pour expérimenter les solutions, et la vigilance sur l'impact du développement du numérique, restent plus que jamais importants pour préparer l'avenir...**



Nathalie TOULON
Chaire AgroTIC
Les Etudes d'Opportunité

Contact : nathalie.toulon@agro-bordeaux.fr



RÉFÉRENCES

- 1.** ECHOS DU NET. Réseaux mobiles : connaissez-vous les différences entre 2G, 3G et 4G ? Echos du Net [en ligne]. 6 avril 2020. [Consulté le 21 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.echosdunet.net/dossiers/reseaux-mobiles-differences-entre-2g-3g-et-4g>
- 2.** LAUNAY, Frédéric. eMBB | Frédéric Launay. [en ligne]. [Consulté le 26 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/tag/embb/>
- 3.** ARCEP. Observatoire des marchés des communications électroniques - Résultats provisoires 2019 [en ligne]. 16 juin 2020. [Consulté le 20 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.arcep.fr/fileadmin/reprise/observatoire/marche-an2019/obs-annuel-2019-prov_160620.pdf
- 4.** BERTRAND, Cécile. Le coût écologique de la 5G en quatre questions. Les Echos. 7 août 2020. Vol. 23257, n° 23257, pp. 18.
- 5.** ANFR. La 5G : de nouvelles bandes, mais aussi... la bande 700 MHz. [en ligne]. 1 juillet 2020. [Consulté le 29 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.anfr.fr/toutes-les-actualites/actualites/la-5g-de-nouvelles-bandes-mais-aussi-la-bande-700-mhz/>
- 6.** Follenfant et al. - DÉPLOIEMENT DE LA 5G EN FRANCE ET DANS LE MONDE.pdf [en ligne]. [Consulté le 29 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.economie.gouv.fr/files/2020/Deploiement_5G_France_et_monde_aspects_techniques_et_sanitaires.pdf
- 7.** GSMA. 5G TDD Synchronisation Q&A Recommendations for the Coexistence of TDD Networks in the 3.5 GHz range [en ligne]. avril 2020. [Consulté le 4 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2020/04/3.5-GHz-5G-TDD-Synchronisation-QA.pdf>
- 8.** LAUNAY, Frédéric. OFDM | Frédéric Launay. [en ligne]. [Consulté le 9 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : <http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/tag/ofdm/>
- 9.** SAWAKINOME.COM. Différence entre OFDM et OFDMA / Réseau d'accès. La différence entre des objets et des termes similaires. [en ligne]. [Consulté le 9 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://fr.sawakinome.com/articles/access-network-communication/difference-between-ofdm-and-ofdma.html>
- 10.** NATIONAL INSTRUMENTS. White Paper - 5G New Radio : Introduction à la couche physique [en ligne]. 2018. [Consulté le 10 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : <ftp://ftp.ni.com/evaluation/rf/5g-new-radio-wp-fr.pdf>
- 11.** CIENA.FR. Que signifie SDN ? - Ciena. [en ligne]. [Consulté le 8 septembre 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.ciena.fr/insights/what-is/What-is-SDN_fr_FR.html
- 12.** ARCEP. Réseau du futur – Architectures agiles Virtualisation des réseaux [en ligne]. mai 2019. [Consulté le 11 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.fratel.org/documents/2019/05/reseaux_du_futur-virtualisation_des_reseaux-fev2019.pdf
- 13.** LAUNAY, Frédéric. Les tranches de réseau : Network Slicing | Frédéric Launay. [en ligne]. [Consulté le 8 septembre 2020]. Disponible à l'adresse : <http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/2018/02/11/les-tranches-de-reseau-network-slicing/>
- 14.** ORDONEZ-LUCENA, Jose, AMEIGEIRAS, Pablo, LOPEZ, Diego, RAMOS-MUNOZ, Juan J., LORCA, Javier et FOLGUEIRA, Jesus. Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges. IEEE Communications Magazine. mai 2017. Vol. 55, n° 5, pp. 80-87. DOI 10.1109/MCOM.2017.1600935.
- 15.** ORTHOLAND, Jean-Michel. Connectivity, protocols, security and IoT needs : a compass to find a path [en ligne]. 4 décembre 2020. Orange Business Services. [Consulté le 9 décembre 2010]. Disponible à l'adresse : https://www.orange-business.com/sites/default/files/connectivites-protocoles-and-security_dec2020.pdf
- 16.** GSMA IN PARTNERSHIP WITH KPN. Smart Farming: Weed Elimination with 5G Autonomous Robots [en ligne]. février 2020. GSMA Head Office. [Consulté le 13 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.gsma.com/iot/resources/smart-farming-weed-elimination-with-5g-autonomous-robots/>
- 17.** RAZAAK, Manzoor, KERDEGARI, Hamideh, DAVIES, Eleanor, ABOZARIBA, Raouf, BROADBENT, Matthew, MASON, Katy, ARGYRIOU, Vasileios et REMAGNINO, Paolo. An Integrated Precision Farming Application Based on 5G, UAV and Deep Learning Technologies. In : . 2019. pp. 109-119. ISBN 978-3-030-29929-3.
- 18.** PORTIER, Michel. AUTOGUIDAGE GPS | La précision du RTK à moindre coût. Réussir Grandes Cultures : le média des céréaliers [en ligne]. [Consulté le 16 décembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.reussir.fr/grandes-cultures/la-precision-du-rtk-moindre-cout>
- 19.** DUBOIS, Marion. Le tracteur télécommandé : un nouvel outil de travail. La-République-des-Pyrénées [en ligne]. 23 février 2017. [Consulté le 18 décembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.larepubliquespyrenees.fr/2017/02/23/le-tracteur-telecommande-un-nouvel-outil-de-travail,2100575.php>
- 20.** DUQUEF, Sébastien. Tracteur télécommandé Valtra pilote son tracteur à des centaines de kilomètres grâce à la 5G ! Terre-net [en ligne]. 25 mai 2020. [Consulté le 18 décembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.terre-net.fr/materiel-agricole/tracteur-quad/article/autonome-valtra-piloteson-tracteur-a-des-centaines-de-kilometres-grace-a-la-5g-207-169268.html>
- 21.** HYLTEL DATAGRI POUR TERRE-NET MÉDIA ET FRANCE AGRICOLE. Les agriculteurs et internet - Equipements et pratiques [en ligne]. juin 2019. [Consulté le 7 décembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://fliphtml5.com/uuvsa/zwbe/basic>
- 22.** UFC-QUE CHOISIR. Débit Internet – On est loin du compte. [en ligne]. 21 mars 2019. [Consulté le 22 décembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.quechoisir.org/decryptage-debit-internet-on-est-loin-du-compte-n65015/>
- 23.** LA FRANCE AGRICOLE. Internet : Les galères des agriculteurs dans les zones blanches. La France Agricole [en ligne]. [Consulté le 22 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.lafranceagricole.fr/actualites/elevage/internet-les-galeres-des-agriculteurs-dans-les-zones-blanches-1,15,894469733.html>
- 24.** COUPECHOUX, Marceau. Les débits en 5G: mythes et réalité [en ligne]. 16 septembre 2020. [Consulté le 17 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1605170235/user_upload/grands_dossiers/5G/debits-5g-mythes-realites.pdf
- 25.** KOENIG, Raphaël et BRIANTAIS, Chrystelle. Quel avenir pour les satellites de télécommunications ? ZDNet France [en ligne]. [Consulté le 22 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.zdnet.fr/actualites/quel-avenir-pour-les-satellites-de-telecommunications-39909707.htm>
- 26.** ROUSSILHE, Gauthier. Gauthier Roussilhe | La controverse de la 5G. [en ligne]. [Consulté le 2 septembre 2020]. Disponible à l'adresse : <http://gauthierroussilhe.com/fr/projects/controverse-de-la-5g>
- 27.** ERICSSON. Ericsson Mobility Report November 2020 [en ligne]. novembre 2020. [Consulté le 23 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.ericsson.com/4adc87/assets/local/mobility-report/documents/2020/november-2020-ericsson-mobility-report.pdf>
- 28.** FUTURA SCIENCES (AFP-RELAXNEWS). La 5G dans le monde : état des lieux. Futura [en ligne]. [Consulté le 17 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/reseau-5g-monde-etat-lieux-83261/>
- 29.** RÉPUBLIQUE FRANÇAISE - COLLÈGE DES EXPERTS. Faire de la France une économie de rupture technologique. Soutenir les marchés émergents à forts enjeux de compétitivité. [en ligne]. 7 février 2020. [Consulté le 18 novembre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.economie.gouv.fr/files/Rapport_college_experts_06_02.pdf
- 30.** LEJEUNE, Léa. Les opérateurs se disputent les fréquences 5G dans un climat de méfiance. Challenges (site web) [en ligne]. 29 septembre 2020. Disponible à l'adresse : https://www.challenges.fr/high-tech/telecoms/les-operateurs-se-disputent-les-frequences-5g-dans-un-climat-de-mefiance_729504
- 31.** HUAWAI, XLABS WIRELESS, et MARKETSSANDMARKETS. The Connected Farm - A Smart Agriculture Market Assessment [en ligne]. 2017. [Consulté le 22 décembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.huawei.com/-/media/CORPORATE/Images/PDF/v2-smart-agriculture-0517.pdf?la=en>
- 32.** ARCEP. Réseaux du futur - Note n° 5 - L'empreinte carbone du numérique (21 octobre 2019) [en ligne]. 21 octobre 2019. [Consulté le 2 février 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/reseaux-du-futur-empreinte-carbone-numerique-juliet2019.pdf
- 33.** HAUT CONSEIL POUR LE CLIMAT. Maitriser l'impact carbone de la 5G [en ligne]. Décembre 2020. [Consulté le 2 février 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2020/12/haut-conseil-pour-le-climat_rapport-5g.pdf





Les Études d'Opportunité

Contact : **Nathalie Toulon**,

nathalie.toulon@agro-bordeaux.fr



l'institut Agro
agriculture • alimentation • environnement



Retrouvez toute l'actualité
de la Chaire AgroTIC sur :

www.agrotic.org

