

Rapport UIT-R SM.2542-0 (06/2024)

Série SM: Gestion du spectre

Contrôle du spectre de prochaine génération – Proactif, autonome et axé sur les données



Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/UIT-R/go/patents/en>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Rapports UIT-R

(Également disponible en ligne: <https://www.itu.int/publ/R-REP/en>)

| Séries | Titre |
|-----------|--|
| BO | Diffusion par satellite |
| BR | Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision |
| BS | Service de radiodiffusion sonore |
| BT | Service de radiodiffusion télévisuelle |
| F | Service fixe |
| M | Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés |
| P | Propagation des ondes radioélectriques |
| RA | Radio astronomie |
| RS | Systèmes de télédétection |
| S | Service fixe par satellite |
| SA | Applications spatiales et météorologie |
| SF | Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe |
| SM | Gestion du spectre |
| TF | Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires |

Note: Ce Rapport UIT-R a été approuvé en anglais par la Commission d'études aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2024

© UIT 2024

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RAPPORT UIT-R SM.2542-0

**Contrôle du spectre de prochaine génération –
Proactif, autonome et axé sur les données**

(2024)

TABLE DES MATIÈRES

| | <i>Page</i> |
|---|-------------|
| Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)..... | ii |
| 1 Termes, définitions et abréviations..... | 2 |
| 1.1 Mégadonnées | 2 |
| 1.2 Intelligence artificielle | 2 |
| 1.3 Apprentissage automatique..... | 2 |
| 1.4 Apprentissage automatique par radiofréquence..... | 3 |
| 1.5 Abréviations..... | 3 |
| 2 Introduction | 4 |
| 3 Contrôle distribué du spectre..... | 5 |
| 3.1 Éléments d'un système distribué de contrôle du spectre..... | 6 |
| 3.2 Difficultés posées par les mégadonnées pour un système distribué de contrôle du spectre | 7 |
| 4 Contrôle du spectre axé sur les mégadonnées | 12 |
| 4.1 Avantages du contrôle du spectre axé sur les mégadonnées | 12 |
| 4.2 Solution de contrôle du spectre axée sur les mégadonnées | 12 |
| 4.3 Couche de collecte RF: exemple de réseau de contrôle du spectre axé sur les mégadonnées..... | 13 |
| 4.4 Couche de stockage des données | 14 |
| 4.5 Couche de gestion des données | 17 |
| 5 Connaissance du spectre en temps réel axée sur les données par apprentissage RFML | 20 |
| 6 Résumé | 22 |
| 7 Références | 22 |
| Annexe 1 – Solution de contrôle du spectre axée sur les mégadonnées et assistée par l'IA en Corée (République de)..... | 23 |
| Annexe 2 – Acquisition mobile de mégadonnées par des véhicules de transports publics pour la cartographie du spectre | 29 |

Objet

Le présent Rapport a pour objet l'application des tendances nouvelles en sciences des données, notamment des technologies d'intelligence artificielle et de mégadonnées, pour l'automatisation du contrôle du spectre. Il récapitule les approches réactives et circonstanciées suivies actuellement en matière de gestion du spectre, puis détaille les approches de prochaine génération, proactives, autonomes et axées sur les données, qui font appel à l'intelligence artificielle et aux mégadonnées. Il donne plusieurs exemples de mise en œuvre qui illustrent l'efficacité des méthodes en question.

1 Termes, définitions et abréviations

1.1 Mégadonnées

La Recommandation UIT-T Y.3600 – *Mégadonnées – Exigences et capacités pour les mégadonnées basées sur l'informatique en nuage*, définit les mégadonnées comme un «modèle qui permet de collecter, stocker, gérer, analyser et visualiser d'immenses ensembles de données ayant des caractéristiques hétérogènes, éventuellement en respectant des contraintes de temps réel». Ces séries de données ont notamment pour caractéristiques d'être extrêmement volumineuses, rapides et diverses. Il est question dans le présent rapport de la production de mégadonnées sur le spectre à partir de réseaux de contrôle à distribution dense qui imposent de procéder à un traitement local et un central pour l'acheminement, le stockage et l'affichage des informations obtenues. En raison des exigences de réseau et d'informatique en nuage imposées par une telle configuration, certaines publications de l'UIT traitant de l'infrastructure de l'information seront citées ici.

1.2 Intelligence artificielle

La Recommandation UIT-T M.3080 – *Cadre d'exploitation et de gestion améliorées des télécommunications reposant sur l'intelligence artificielle (AITOM)*, définit l'intelligence artificielle (AI) comme un système informatisé qui utilise les fonctions cognitives pour comprendre les informations et résoudre les problèmes. La norme ISO/CEI 2382-28 définit l'IA comme un «domaine interdisciplinaire, communément considéré comme branche de l'informatique, consacré au développement de modèles et de systèmes capables d'exécuter des fonctions généralement associées à l'intelligence humaine, telles que le raisonnement et l'apprentissage». Dans le domaine des sciences informatiques, la recherche sur l'IA est définie comme l'étude des «agents intelligents»: tous les dispositifs qui perçoivent leur environnement et réalisent des actions pour atteindre leurs buts. Cela inclut la reconnaissance des formes et l'application de l'apprentissage automatique ainsi que des techniques associées. L'intelligence artificielle est l'idée conceptuelle globale selon laquelle les machines sont capables de réaliser des tâches d'une manière similaire à l'intelligence humaine et pourraient être considérées comme «intelligentes». Des études complémentaires sur ces questions sont encouragées.

1.3 Apprentissage automatique

La Recommandation UIT-T Y.3172 – *Cadre architectural pour l'apprentissage automatique dans les réseaux futurs, y compris les IMT-2020*, définit l'apprentissage automatique comme les processus permettant à des systèmes de calcul de comprendre des données et d'en déduire des connaissances, sans qu'il soit nécessaire de les programmer de manière explicite. L'apprentissage automatique supervisé et l'apprentissage automatique non supervisé sont des exemples de différents types d'apprentissage automatique.

1.4 Apprentissage automatique par radiofréquence

«... des études récentes ont montré que l'apprentissage automatique profond était une technologie facilitatrice pour les applications de radiocommunication cognitives, et également un outil efficace pour compléter les algorithmes définis par les spécialistes pour des applications de détection du spectre comme la détection, l'estimation et la classification des signaux (le terme utilisé ici étant «apprentissage automatique par radiofréquence», abrégé en RFML pour *radio frequency machine learning*). Un facteur important qui incite à utiliser l'apprentissage automatique profond dans le contexte des communications hertziennes est qu'il n'est guère voire pas du tout nécessaire de connaître l'environnement spectral à l'avance du fait que l'on dispose déjà de données représentatives abondantes pour faciliter l'apprentissage et l'évaluation.» [1]

1.5 Abréviations

| | |
|-------|--|
| AOA | angle d'arrivée (<i>angle of arrival</i>) |
| API | interface de programmation d'application (<i>application programming interface</i>) |
| BD | base de données (<i>database</i>) |
| BI | veille stratégique (<i>business intelligence</i>) |
| DF | radiogoniomètre, radiogoniométrie (<i>direction finder, direction finding</i>) |
| DMR | radiocommunications mobiles numériques (<i>digital mobile radio</i>) |
| GUI | interface graphique d'utilisateur (<i>graphical user interface</i>) |
| I/Q | en phase, en quadrature de phase (<i>in-phase/quadrature phase</i>) |
| IA | intelligence artificielle (<i>artificial intelligence</i>) |
| IFP | indicateur fondamental de performance (<i>key performance indicator</i>) |
| IoT | Internet des objets (<i>Internet of things</i>) |
| LAN | réseau local hertzien (<i>local area network</i>) |
| LTE | évolution à long terme (<i>long term evolution</i>) |
| ML | apprentissage automatique (<i>machine learning</i>) |
| PU | utilisateur primaire (<i>primary user</i>) |
| QoE | qualité d'expérience (<i>quality of experience</i>) |
| QoS | qualité de service (<i>quality of service</i>) |
| RBW | résolution de bande de fréquences (<i>resolution bandwidth</i>) |
| RF | radiofréquence (<i>radio frequency</i>) |
| RFML | apprentissage automatique par radiofréquence (<i>radio frequency machine learning</i>) |
| RSS | intensité du signal reçu (<i>received signal strength</i>) |
| SQL | langage de requête structuré (<i>structured query language</i>) |
| TDOA | différence entre les instants d'arrivée (<i>time-difference-of-arrival</i>) |
| TRF | transformée rapide de Fourier (<i>fast fourier transform</i>) |
| UAV | aéronef sans pilote (<i>unmanned aerial vehicle</i>) |
| WCDMA | accès multiple par répartition de code à large bande (<i>wideband code-division multiple access</i>) |

2 Introduction

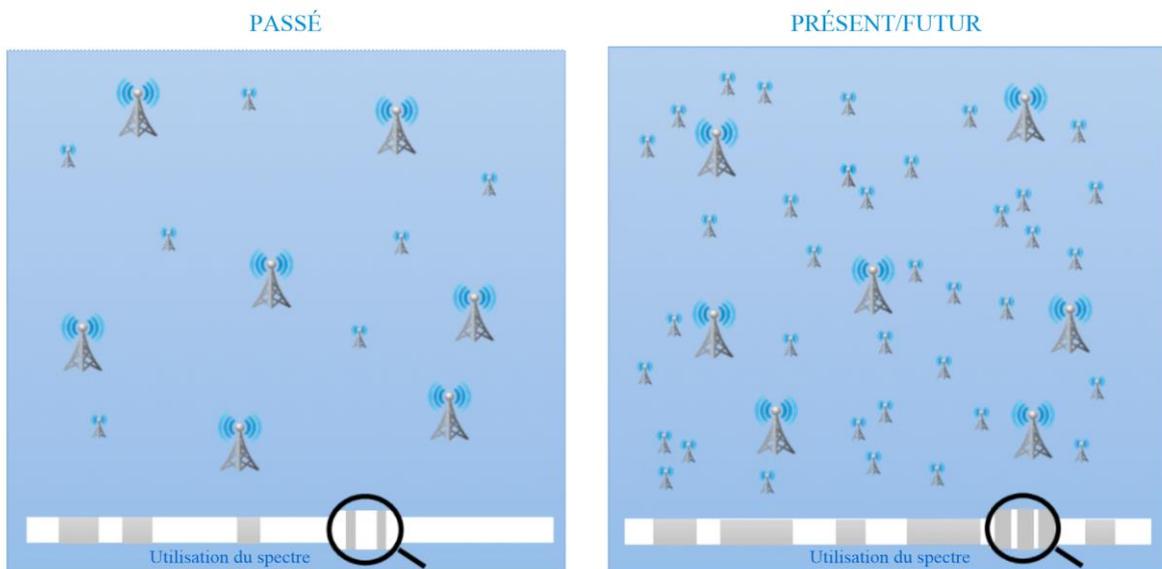
Le spectre radioélectrique est une ressource limitée et la demande de spectre continue d'augmenter pour de nouvelles technologies radioélectriques. Le progrès constant des techniques de communication hertzienne s'est traduit par de nouvelles normes, à la faveur:

- de fréquences porteuses plus élevées, pour diverses assignations de bande;
- d'une largeur de bande de modulation plus importante;
- de niveaux de puissance d'émission plus faibles pour accroître la capacité des systèmes par une réutilisation des fréquences.

Cette évolution technologique conduit à déployer des systèmes de radiocommunication utilisant un grand nombre d'émetteurs de moindre puissance pour assurer la couverture d'une zone géographique. Une stratégie moderne de contrôle du spectre doit tenir compte de ce type de déploiement des émetteurs, tout en restant capable d'assurer le contrôle d'émetteurs «traditionnels» tels que ceux utilisés pour la radiodiffusion MF et télévisuelle ou les communications du trafic aérien reposant sur les émissions en MA analogiques conventionnelles.

FIGURE 1

L'évolution vers une densité élevée en émetteurs à faible puissance



Rapport SM.2542-1

Dans ces conditions, le contrôle du spectre est devenu une tâche complexe, qui demande des données denses et très détaillées concernant l'utilisation du spectre quelle que soit la fréquence, la période ou le lieu. Les méthodes courantes de contrôle du spectre ne permettent pas toujours de disposer de la densité de données nécessaire pour gérer le spectre contemporain.

Les autorités nationales disposent souvent de services spécialisés pour le contrôle systématique des émissions radioélectriques afin de produire des connaissances sur l'utilisation du spectre et d'éclairer le processus réglementaire et, si nécessaire, les procédures d'application de la loi. Pour évaluer l'utilisation [2] afin de gérer efficacement le spectre, ces services produisent des données sur l'occupation qui servent de base pour de nombreuses tâches de gestion du spectre allant de l'optimisation des recettes de licences à la vérification du respect des dispositions en vigueur et au règlement des problèmes de brouillage. Parallèlement, le progrès rapide des communications

hertziennes, qu'il s'agisse du nombre d'émetteurs ou des normes, rend plus difficiles à mesurer et à suivre les changements qui interviennent dans l'utilisation du spectre.

Le contrôle du spectre fait normalement appel aux compétences d'agents qualifiés recourant à des outils comme les spectrogrammes, la densité spectrale de puissance et la démodulation pour identifier les émetteurs, localiser les contrevenants et rendre compte des caractéristiques d'utilisation du spectre. Par ailleurs, si des outils d'ingénierie du spectre comme les cartes de couverture qui représentent les modèles de propagation et leurs effets apportent une visibilité concernant l'utilisation du spectre, ils sont tributaires des compétences techniques et/ou des connaissances tacites de l'utilisateur pour l'analyse des données de contrôle du spectre et la prise des décisions nécessaires. Il s'agit de compétences difficiles à reproduire et à développer à plus grande échelle, ce qui limite la capacité d'action des Administrations face aux difficultés croissantes de la gestion du spectre.

À l'inverse, le futur contrôle du spectre axé sur les données doit permettre moins d'intervention humaine et davantage de surveillance autonome. Le contrôle du spectre axé sur les données est ainsi capable de détecter certains signaux même quand la densité d'émetteurs est importante. Il est aussi capable de recueillir de façon autonome un fort volume de données sur le spectre. Le contrôle du spectre axé sur les données permet de relier les données antérieures et futures grâce aux bases de données constituées, d'où la possibilité d'un travail plus efficace des personnes chargées du contrôle du spectre. Des systèmes évolués de contrôle du spectre peuvent aider les Administrations à gérer plus facilement les événements anormaux dans le spectre, tout en assurant une couverture étendue, si la densité du réseau le permet.

Le contrôle du spectre axé sur les données peut être utilisé pour repérer les tendances et anticiper les événements futurs en analysant les caractéristiques des signaux. Le service de contrôle est alors en mesure de se préparer comme il se doit.

Les pratiques d'allocation du spectre font normalement appel à des «attributions statiques» consistant à délivrer une licence à un utilisateur principal exclusivement dans une perspective de long terme et pour des zones géographiques étendues. Exception faite de certains services comme les services de radiodiffusion, il est rare que les titulaires de licences utilisent intégralement les fréquences qui leur sont attribuées. Bien souvent, une partie de la (des) bande(s) allouée(s) reste sous-utilisée. Le contrôle du spectre axé sur les données peut rendre les pratiques de gestion du spectre plus efficaces.

Pour améliorer les pratiques de gestion du spectre, les caractéristiques de l'utilisation du spectre doivent être établies avec précision au niveau des pays, des régions, des villes et des localités. Il s'agit donc de déterminer le spectre disponible dans le temps et dans l'espace pour la zone considérée. Le spectre disponible est aussi décrit – au sens spatial et temporel – par l'expression «trous dans le spectre». On parle de trou temporel dans le spectre lorsqu'aucune transmission n'est effectuée par des utilisateurs primaires pendant un certain temps, et de trou spatial dans le spectre quand aucune transmission d'utilisateur primaire n'est détectée en un lieu ou dans une zone donnée.

3 Contrôle distribué du spectre

La gestion du spectre de prochaine génération exploite et regroupe la capacité des bandes de fréquences sous-utilisées selon une approche intégrée qui tire parti de progrès récents dans la détection par radiofréquence (RF), la détection distribuée et la détection mobile qui autorisent des mesures de géolocalisation, des bases de données centralisées, des analyses et un apprentissage ML pour augmenter la capacité, améliorer la couverture et atténuer les brouillages.

Une stratégie autonome de contrôle du spectre est capable d'adapter les tâches de contrôle en fonction de la situation et de répondre directement aux demandes significatives à l'aide de tableaux de bord qui donnent une information sur des IFP du spectre radioélectrique comme l'utilisation, l'efficacité, l'attribution, les utilisateurs et le spectre disponible par lieu, période et bande de fréquences. On trouvera à l'Annexe 1 un exemple de stratégie de contrôle distribué du spectre de prochaine génération

qui décrit l'expérience de la Corée (République de) concernant l'utilisation de ces méthodes de contrôle du spectre.

3.1 Éléments d'un système distribué de contrôle du spectre

Un effort coordonné et concentré pour recueillir une information très détaillée sur l'allocation et l'utilisation du spectre à grande échelle demande un grand nombre de capteurs de contrôle du spectre qui soient distribués géographiquement, et puissent être adaptés à l'évolution des conditions d'exploitation et des exigences techniques.

La gestion d'un réseau de capteurs distribués et du volume important de données qu'ils produisent impose de fusionner des données provenant de multiples capteurs et de sélectionner le jeu de données optimal pour la prise des décisions. Il faut pour cela des algorithmes intelligents capables d'analyser les données et d'appliquer les connaissances du domaine afin de produire l'information nécessaire aux diverses parties prenantes.

Une fonction essentielle du contrôle du spectre est d'établir comment le spectre est utilisé pour les différentes dimensions (temps, fréquence, lieu, orientation, etc.) afin de déterminer les ressources disponibles dans le spectre. L'élaboration de cartes détaillées de l'occupation du spectre au niveau des pays, des régions, des villes et des localités demande une surveillance constante du spectre, ce qui est difficile et accapare du temps.

Compte tenu de ce qui précède, les éléments suivants permettent aux pays de constituer un système évolutif et dynamique de contrôle du spectre qui offre une solution avantageuse, exploitable jusqu'à l'échelon local et sur un grand nombre de fréquences:

- a) Les systèmes de contrôle traditionnels fixes resteront indispensables pour le contrôle, en particulier lorsqu'il faut utiliser de grandes antennes. Il en va ainsi notamment du contrôle dans les bandes d'ondes décimétriques, métriques et décimétriques ou des stations de contrôle de satellite à haute sensibilité. De telles stations peuvent aussi être utiles pour réaliser des mesures DF en vue de régler des brouillages ou d'identifier des émetteurs illégaux. Il n'est pas tenu compte ici des questions d'organisation en cas de défaillance du réseau, à savoir l'exploitation d'une station de contrôle qui soit indépendante du réseau et pourvue de personnel.
- b) Il est possible d'utiliser de petits systèmes de capteurs RF peu onéreux pour des mesures à long terme comme l'évaluation de l'occupation saisonnière, ou pour évaluer certains cas de brouillage à faibles signaux intermittents qui peuvent demander des mesures à long terme.
- c) Des systèmes de contrôle mobiles et portables peuvent être utilisés afin d'obtenir une résolution spatiale élevée pour une gestion dynamique du spectre, ce que les stations fixes ne permettent pas. On trouvera à l'Annexe 2 du présent Rapport des exemples de solutions de contrôle mobiles et portables permettant d'effectuer des mesures localisées de l'intensité de champ, d'évaluer la couverture et de détecter les brouillages.

Les données de contrôle transmises en grand nombre au centre de contrôle ajouteront aux difficultés de gestion des mégadonnées, et il faudra donc impérativement disposer de bases de données centralisées et d'outils d'analyse offrant des tableaux de bord en temps réel.

Les affichages indiquant l'emplacement général de plusieurs émetteurs d'après la base de données des licences, parallèlement aux mesures DF et RSS, sont utiles pour évaluer la densité en émetteurs, l'occupation du spectre et les trous dans le spectre à l'échelon local. Pour déterminer l'emplacement précis des émetteurs perturbateurs, on aura recours à différentes techniques de géolocalisation (TDOA, AOA et hybrides). En raison de la faible puissance de nombreux émetteurs, les systèmes mobiles et distribués vont gagner en importance pour le contrôle et la géolocalisation des petits capteurs. En outre, ces systèmes devront pouvoir détecter et localiser les émetteurs fonctionnant dans les gammes de fréquences supérieures.

3.1.1 Traitement local/en périphérie au niveau des récepteurs de contrôle

Le traitement local vise à transformer les données brutes à large bande créées par le récepteur de contrôle en une forme d'information agrégée et transportable et de rapprocher les renseignements sur le spectre de la périphérie du réseau. Le traitement et le stockage au niveau local permettent une analyse plus rapide, un traitement comparatif des instantanés du spectre et une prise de décision automatique en temps réel. L'utilisation du traitement des signaux, rendue possible par des convertisseurs abaisseurs numériques (DDC), accroît la visibilité et la précision de l'environnement de signalisation et des changements intervenant dans celui-ci. Le traitement local réduit aussi la charge supportée par le réseau de communication reliant les récepteurs, les processeurs centraux et le stockage des données sans perdre les données et les résultats d'analyse importants.

L'intelligence artificielle (IA), en particulier sous forme d'apprentissage automatique par radiofréquence (RFML), peut devenir une nécessité pour traiter le volume important de données de contrôle en temps réel pour un grand nombre de sites. Des capteurs dotés de processeurs locaux et de capacités RFML seront nécessaires pour réduire la quantité de données à acheminer par le réseau (voir § 5). Des capteurs secondaires moins performants peuvent être utilisés pour étendre la couverture géographique au moindre coût.

Certaines données de séries temporelles I/Q devront être enregistrées localement et transférées au centre de contrôle pour le traitement des signaux inconnus, et pourront y être utilisées afin d'entraîner un réseau neuronal à reconnaître ces signaux à l'échelle du réseau de contrôle.

3.1.2 Sécurité des données

Vu la quantité de données susceptible d'être recueillie et transférée à un centre de contrôle, il est sans doute judicieux de prévoir des mesures appropriées de sécurité des données, qui peuvent consister dans le cryptage des données, ou d'autres mesures de sécurité des données. Ce sujet est traité en détail dans la Recommandation UIT-T X.1601 – Cadre de sécurité applicable à l'informatique en nuage. Des nouvelles technologies comme la chaîne de blocs peuvent être utiles pour ces réseaux. La chaîne de blocs (notamment la modalité de la chaîne d'alliances) est une technologie du registre distribué conçue par l'intégration et l'innovation de technologies informatiques comme le stockage distribué de données, la transmission d'homologue à homologue, les mécanismes de consensus, les algorithmes de cryptage et les contrats intelligents. Elle a pour caractéristiques la transparence, la traçabilité et l'inviolabilité.

3.2 Difficultés posées par les mégadonnées pour un système distribué de contrôle du spectre

Déployer un grand nombre de capteurs et de récepteurs RF distribués pour accomplir un contrôle continu sur de larges segments du spectre soulève des problèmes de capacité du réseau, d'où la possibilité de coûts élevés pour l'entretien des connexions réseau vers un ou plusieurs centres de traitement. Le volume des données de contrôle est directement lié au type de données transmises par les capteurs RF: données de séries temporelles, données spectrales de TRF ou données paramétriques RF (voir description ci-après). Chaque type de données est nécessaire pour différentes mesures courantes dans les tâches de contrôle. À titre d'exemple, la classification et l'identification technique des signaux nécessitent souvent des données de séries temporelles I/Q, tandis que les mesures d'occupation peuvent être effectuées à l'aide de données spectrales ou de données paramétriques RF. Les données de séries temporelles I/Q, forme la plus lourde de données de contrôle, sont celles qui demandent la plus forte capacité de réseau pour transférer une certaine largeur de bande, par rapport aux données spectrales ou paramétriques RF.

3.2.1 Types de données de contrôle et incidence sur la largeur de bande du réseau

À titre d'exemple, la transmission en continu de données de séries temporelles I/Q à une largeur de bande d'acquisition de 20 MHz exige un débit de $1,25 \text{ (forme du filtre)} * 20 \text{ MHz (largeur de bande)}$

* 2 (I et Q) * 16 bits (I ou Q) = 800 Mbit/s, soit un débit proche de celui d'un réseau LAN gigabitaire. Une contrainte supplémentaire est que la capture des données I/Q doit être continue, de façon que la modulation initiale ne soit pas altérée, ce qui est essentiel pour classer le signal ou effectuer une identification technique. Une heure de flux continu de séries temporelles I/Q produit environ 360 Go de données de surveillance.

Par comparaison, l'observation d'un flux spectral continu d'une largeur de bande de 20 MHz, en utilisant le traitement de trace pour diminuer la résolution temporelle, et en présumant une TRF à 16 000 points, produit un débit de données d'environ 10 Mbit/s. Une heure de flux continu de données spectrales de TRF produit une quantité de données beaucoup moins importante qu'un flux de données I/Q, soit environ 4,5 Go. En diminuant le taux d'actualisation du spectre à 1 balayage/s, on abaisse le débit de données à environ 24 kbit/s. Une heure de contrôle à 1 balayage/s produit alors 86 Mo de données. Le transfert et le stockage des données spectrales brutes sont exigeants en bande passante et en supports de stockage.

Les données paramétriques RF sont obtenues à l'issue du traitement des données spectrales provenant d'un capteur ou d'un récepteur RF. On applique aux données spectrales un niveau ou une autre forme de seuil, et si l'énergie dépasse le seuil, on en extrait les paramètres externes de base, qui seront stockés et/ou accumulés pendant un certain temps. Cette forme de détection de l'énergie peut être utile pour les mesures d'occupation et ne comporte aucun transfert ni traitement de l'énergie du bruit (ou du signal) en dessous du seuil d'énergie (voir Fig. 2). Les paramètres qui peuvent être extraits sont les suivants:

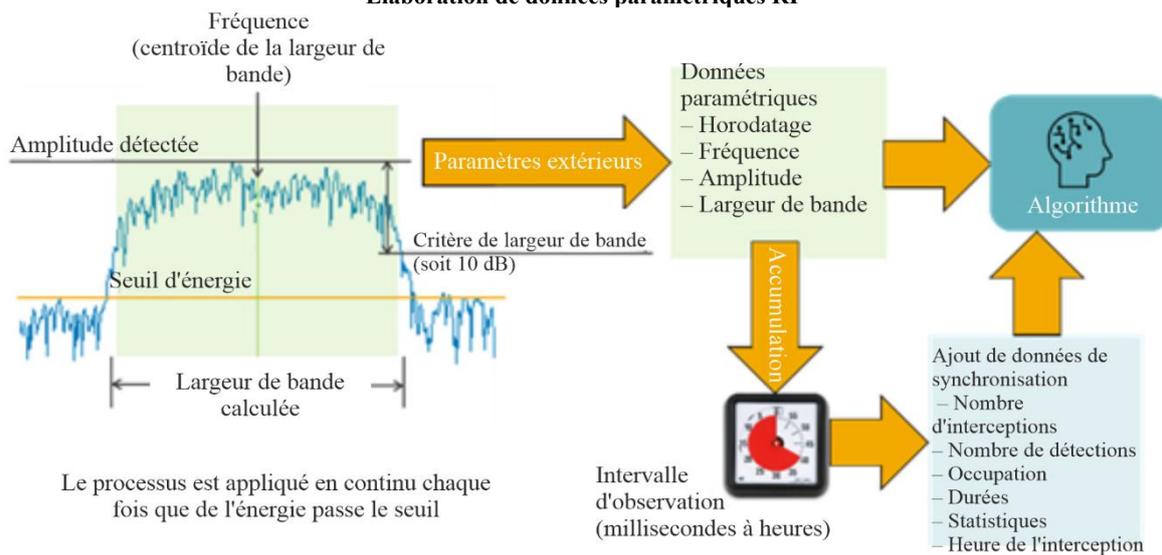
- fréquence centrale;
- largeur de bande;
- amplitude/intensité du champ;
- horodate.

Si un intervalle d'observation est appliqué à la collecte de données, il est possible de calculer et de stocker des paramètres supplémentaires. Ces paramètres sont tous calculés dans l'intervalle spécifié:

- pourcentage d'occupation;
- date et heure de la première et de la dernière interception;
- durée (minimum, maximum, moyenne);
- nombre de détections;
- statistiques sur la largeur de bande (minimum, maximum, moyenne);
- statistiques sur l'amplitude/l'intensité du champ (minimum, maximum, moyenne).

FIGURE 2

Élaboration de données paramétriques RF



Rapport SM.2542-2

Le recours à un intervalle d'observation permet d'actualiser le balayage spectral en temps réel, tandis que la transmission de données est réduite à un enregistrement par cas d'énergie détectée pour chaque intervalle d'observation.

Ce processus améliore l'efficacité des données du contrôle du spectre en convertissant les données spectrales brutes en données de texte qu'il est possible de transférer ou de stocker pour les analyser et les analyser ultérieurement, et permet de présenter des données bien formatées aux algorithmes ML.

Pour créer des données spectrales de TRF ou des données paramétriques RF, un système de contrôle doit être capable de numériser la sortie du récepteur (échantillons TRF) en temps réel et d'intégrer un traitement local. En allant plus loin, des outils intelligents locaux permettant de repérer les anomalies et d'accéder à la base de données des licences augmentent la complexité et le coût de la station de contrôle, mais diminuent le coût du trafic réseau. Idéalement, une station de contrôle RF est capable de produire toutes les formes de données nécessaires à l'appui des différentes tâches de contrôle. À mesure que les systèmes de contrôle seront déployés à plus forte densité pour la détection des services hertziens à bas niveau et des brouillages localisés, un traitement plus important assisté par algorithmes ML sera nécessaire pour réduire autant que possible le volume des données sur le réseau.

3.2.2 Algorithmes ML appliqués au contrôle du spectre

Il existe un grand nombre d'articles et d'exposés techniques sur le contrôle du spectre fondé sur les algorithmes ML. Le présent Rapport propose un résumé succinct des faits nouveaux et des applications. La première étape du développement peut consister à s'entretenir de l'objectif recherché en développant l'apprentissage ML et les avantages qui en sont attendus. Les tâches de contrôle du spectre habituelles pour l'aide aux décisions de gestion sont les suivantes: attribution de fréquences, détection et classification des brouillages, vérification du respect des conditions de licence et maintenance prévisionnelle (éventuellement, pour le cas du contrôle de la liaison descendante de Terre ou de satellite).

À mesure que le concept de partage dynamique du spectre se développera et sera appliqué à certains réseaux cognitifs (p. ex. à l'IoT), une attribution autonome et en temps réel des fréquences, fondée sur un apprentissage profond du spectre local, devra être rendue possible par un contrôle étendu des bandes, et plus particulièrement des données d'occupation [3]. Il sera essentiel de disposer pour les fréquences de données d'occupation détaillées à échanger entre les lieux concernés pour entraîner les

algorithmes ML pour opérer des attributions intelligentes. Il faudra peut-être associer des algorithmes de classification et de test de régression pour réaliser cette capacité.

Pour la détection et la classification des brouillages, un algorithme ML devra observer et apprendre le spectre local. Les données d'entraînement devront représenter l'énergie normale des signaux, puis utiliser une forme de détection des anomalies pour détecter les brouillages. La classification des signaux sera sans doute également importante à cet égard et elle devra faire appel aux réseaux neuronaux, ce qui nécessitera des données de séries temporelles I/Q provenant des récepteurs de contrôle. Voir le § 5.

Les applications de vérification de la conformité aux licences et de maintenance prévisionnelle feront largement appel à des données spectrales ou à des données paramétriques RF (fréquence centrale, largeur de bande, intensité de champ) qui auront été observées et apprises sur des périodes longues et seront traitées par un algorithme de régression.

3.2.3 Types courants d'algorithmes ML

Il existe quatre formes principales d'apprentissage ML pouvant être appliquées au contrôle du spectre: la classification, le test de régression, la détection d'anomalies et le regroupement. En voici une brève description.

- La classification répond à la question de savoir si les données possèdent les attributs caractéristiques de tel ou tel groupe. Le résultat est une catégorie plutôt qu'une valeur. La décision est obtenue à l'issue d'une comparaison avec les données d'entraînement. La méthode peut être appliquée aux données d'occupation pour faciliter la sélection et l'attribution autonomes des fréquences.
- La régression tente de prévoir les liens entre des ensembles de données indépendants et dépendants, en recherchant un ajustement linéaire des données, ce qui représente une forme de corrélation. On aboutit généralement à une valeur comprise entre -1 et $+1$, où 0 représente l'absence de corrélation, $+1$ une corrélation positive et -1 une corrélation négative. Des tests de régression à partir de données spectrales de TRF ou de données paramétriques RF peuvent être utiles pour la maintenance prévisionnelle appliquée à une station terrienne de satellite en contrôlant étroitement l'intensité RSS sur une liaison descendante et en prenant en considération les données environnementales locales concernant l'humidité, les précipitations, la température et le vent. Il importe de garder à l'esprit que les paramètres RF d'un rayonnement mesuré par une station de contrôle peuvent varier selon les changements qui se produisent dans l'environnement local, les conditions de trafic et les modifications de la propagation dues à l'humidité ou à un blocage temporaire du signal.
- La détection d'anomalies consiste à vérifier si le jeu de données comporte des valeurs aberrantes. Les logiciels courants de contrôle du spectre font appel à une détection d'anomalies fondée sur des règles qui utilisent des valeurs critiques pour certains paramètres pour déclencher une alerte ou prendre certaines dispositions. Un détecteur d'anomalies fondé sur l'apprentissage ML établit des modèles à partir des données d'entraînement et vérifie la concordance des nouvelles observations avec un de ces modèles. Les données qui n'y correspondent pas sont signalées comme anomalies potentielles. La détection d'anomalies fondée sur des données spectrales ou des données paramétriques RF peut être utile pour détecter des brouillages ou l'apparition d'un rayonnement inconnu.
- Le regroupement permet de trier les données d'entrée, qui sont généralement des données brutes non étiquetées, par collections fondées sur la similitude des qualités paramétriques décrivant les données. Il peut être utile pour détecter et classer les nouveaux signaux dont le plan de fréquences est inconnu.

Il ne s'agit là que de quelques exemples de ce qui existe aujourd'hui dans le commerce en matière de solutions de contrôle du spectre. Certaines solutions logicielles actuelles permettent une classification très précise des signaux de services modernes tels que la 4G LTE, le WiFi et la 5G à l'aide de données de séries temporelles I/Q traitées par un réseau neuronal.

Les stations de contrôle pouvant nécessiter un traitement plus avancé, il conviendra d'évaluer les compromis entre le coût, la complexité, la densité de capteurs et la capacité de transmission du réseau avant d'arrêter le choix d'une solution.

3.2.4 Métadonnées et synchronisation temporelle

Pour les systèmes de contrôle distribués, il est normalement nécessaire d'adopter une architecture de stockage en amont pour tenir compte des latences et perturbations de réseau. Le stockage en amont est une méthode de communication de données dans laquelle un message transmis à partir d'un nœud source est stocké dans un dispositif intermédiaire avant d'être acheminé vers le nœud de destination.

Dans un déploiement type, chaque site de contrôle détecte les signaux (bandes de fréquences) auxquels on s'intéresse, effectue un certain traitement et établit des caractéristiques détaillées sur le spectre. Comme ces nœuds de contrôle sont indépendants, il est difficile de tirer des éléments utiles de la comparaison de données provenant de différents capteurs en l'absence de cadre de référence. Il est donc essentiel de disposer de métadonnées sur les relevés du site, accompagnées d'un horodatage précis, afin de pouvoir synchroniser les capteurs de contrôle pour mener des études coordonnées de mesure du spectre.

3.2.5 Format des données de capteurs

Les méthodes de mesure du spectre étant nombreuses, il existe beaucoup de types de données. Il sera nécessaire de «lasser» les données d'après leurs caractéristiques, par exemple:

- a) le bruit de fond RF;
- b) la densité spectrale d'énergie ou de puissance;
- c) les échantillons I/Q ou les échantillons TRF;
- d) les échantillons I/Q décimés;
- e) les données d'occupation du spectre;
- f) les données de géolocalisation;
- g) le niveau de métadonnées à l'appui des données de mesure.

3.2.6 Hétérogénéité du matériel de contrôle du spectre

Un système distribué de contrôle du spectre utilisera des capteurs dont les caractéristiques et les paramètres de fonctionnement diffèrent et qui proviennent souvent de plusieurs fournisseurs. Un problème central est de composer avec des équipements de mesure différents, et dont les API de communication, les taux d'échantillonnage, les portées de balayage, les facteurs de bruit et les bandes de fréquences qu'ils prennent en charge sont différents.

Pour que le système de contrôle du spectre soit durable et permanent, tout en étant capable d'évoluer dans le temps, il doit être considéré comme un système de systèmes, le système dans son ensemble ayant une durée de vie indéfinie, tandis que les éléments de contrôle particuliers qui le composent ont une durée de vie limitée. À titre d'exemple, en cas d'obsolescence d'un récepteur du système, il est possible de le remplacer par un récepteur plus récent sans devoir remplacer la totalité du système.

3.2.7 Bases de données locales et centrales

Les bases de données de sites distribués peuvent contenir des renseignements détaillés sur des zones géographiques plus réduites et peuvent être actualisées plus rapidement pour faciliter le partage du

spectre. Une base de données centralisée peut exploiter les résultats et les données de contrôle provenant de différents sites pour faciliter l'analyse. Entre les deux, il ne s'agit pas d'un choix exclusif mais complémentaire, en fonction de la situation. La capacité de fusionner les données de contrôle du spectre permet une analyse fine de l'occupation du spectre à l'échelle du pays, de la région, de la ville ou de la localité.

4 Contrôle du spectre axé sur les mégadonnées

Les réseaux de contrôle du spectre doivent être capables de recueillir et d'intégrer de grandes quantités de données. Les procédures d'exploitation classiques montrent leurs limites lorsque le flux de données est massif (par le volume, la variété et la vitesse). Une méthode de gestion de l'information assistée par l'IA permettra un catalogage du spectre en continu et en temps réel. Ces données offrent un support pour le travail d'analyse, les tableaux de bord en temps réel et les outils de cartographie permettant la visualisation de l'utilisation actuelle et antérieure du spectre, en indiquant les zones de couverture, les zones de brouillages et les fréquences inutilisées:

- application de techniques d'intelligence artificielle pour prendre connaissance de l'environnement du spectre;
- renseignements sur les bandes de fréquences inutilisées et sous-utilisées;
- rapports de brouillages avec géolocalisation et reconnaissance des signaux;
- analyse prévisionnelle et exploration de données pour évaluer les IFP sur l'utilisation du spectre, l'efficacité du spectre, l'attribution du spectre, les utilisateurs du spectre, le spectre disponible et les brouillage;
- solutions de remplacement et améliorations pour l'attribution du spectre/des fréquences, d'après les besoins des utilisateurs.

4.1 Avantages du contrôle du spectre axé sur les mégadonnées

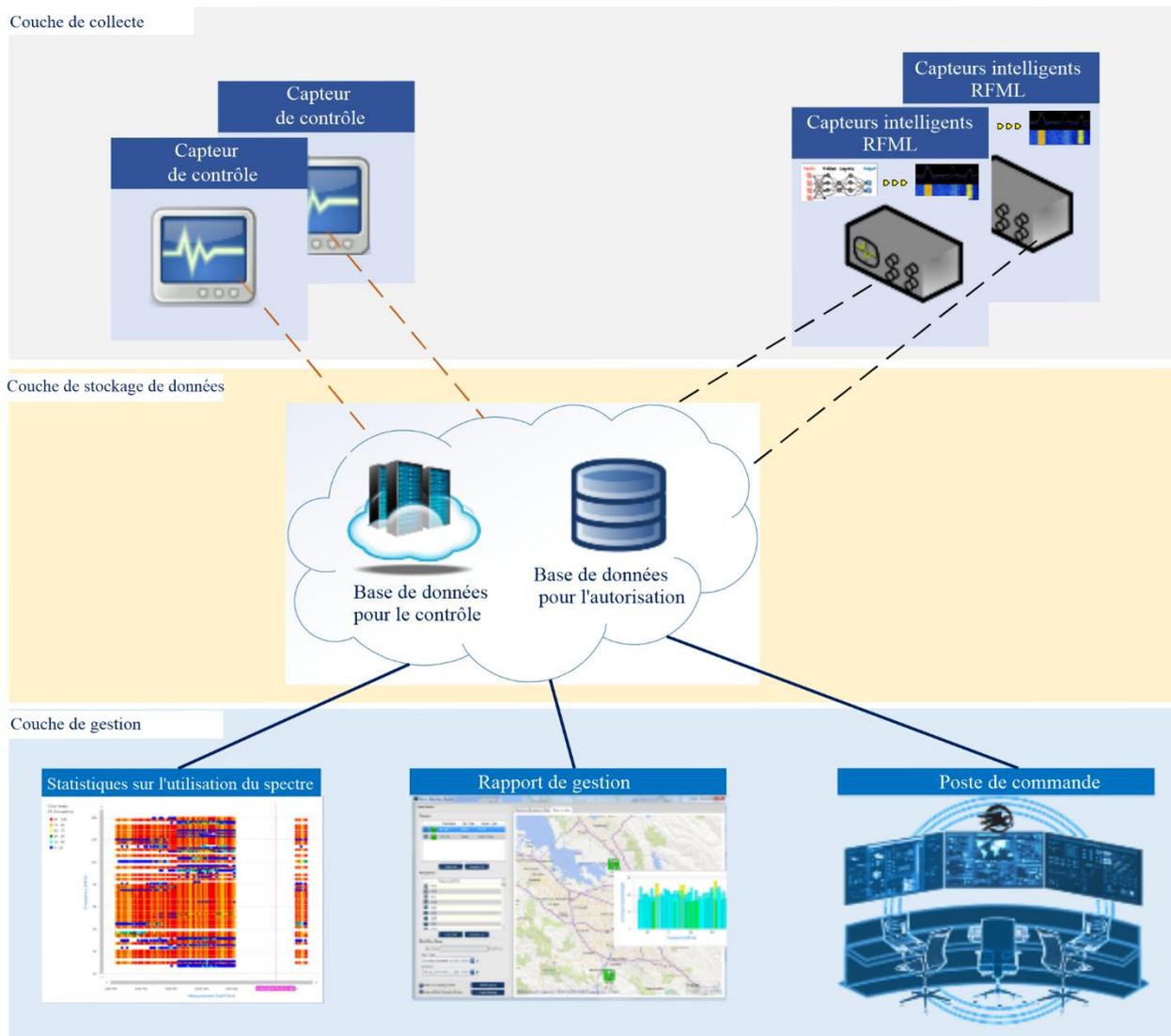
- 1) Examen à la demande de l'utilisation et de la classification du spectre (primaire, secondaire, avec ou sans licence, statique ou dynamique).
- 2) Quantification du spectre disponible par bandes de fréquences et par lieu (monde, région, localité).
- 3) Analyse de la couverture pour l'évaluation QoS et QoE.
- 4) Identification, géolocalisation et catalogage des sources de brouillages et des signaux pertinents.
- 5) Détection des transmissions non autorisées, des dispositifs de brouillage et des services non sollicités.
- 6) Permettre un contrôle actif pour améliorer l'utilisation totale du spectre et l'efficacité spectrale en exploitant le spectre sous-utilisé, si possible avec une attribution dynamique.
- 7) Mettre en œuvre les mesures recommandées par l'UIT pour la surveillance des champs électromagnétiques, la vérification technique, la radiogoniométrie (DF) et la géolocalisation.
- 8) Garantir une détection du signal et une DF/géolocalisation relativement précises.
- 9) Permettre l'extension/l'intégration ultérieures des capteurs provenant de différents fabricants.

4.2 Solution de contrôle du spectre axée sur les mégadonnées

La solution indiquée à la Fig. 3 est un exemple de réseau de contrôle intelligent avec une couche dédiée à la base de données centrale et une couche d'application servant au contrôle détaillé et à

l'application de la législation relative au spectre électromagnétique pour les bandes des ondes métriques, décimétriques, centimétriques et millimétriques.

FIGURE 3
Solution de contrôle du spectre reposant sur les mégadonnées – vue conceptuelle

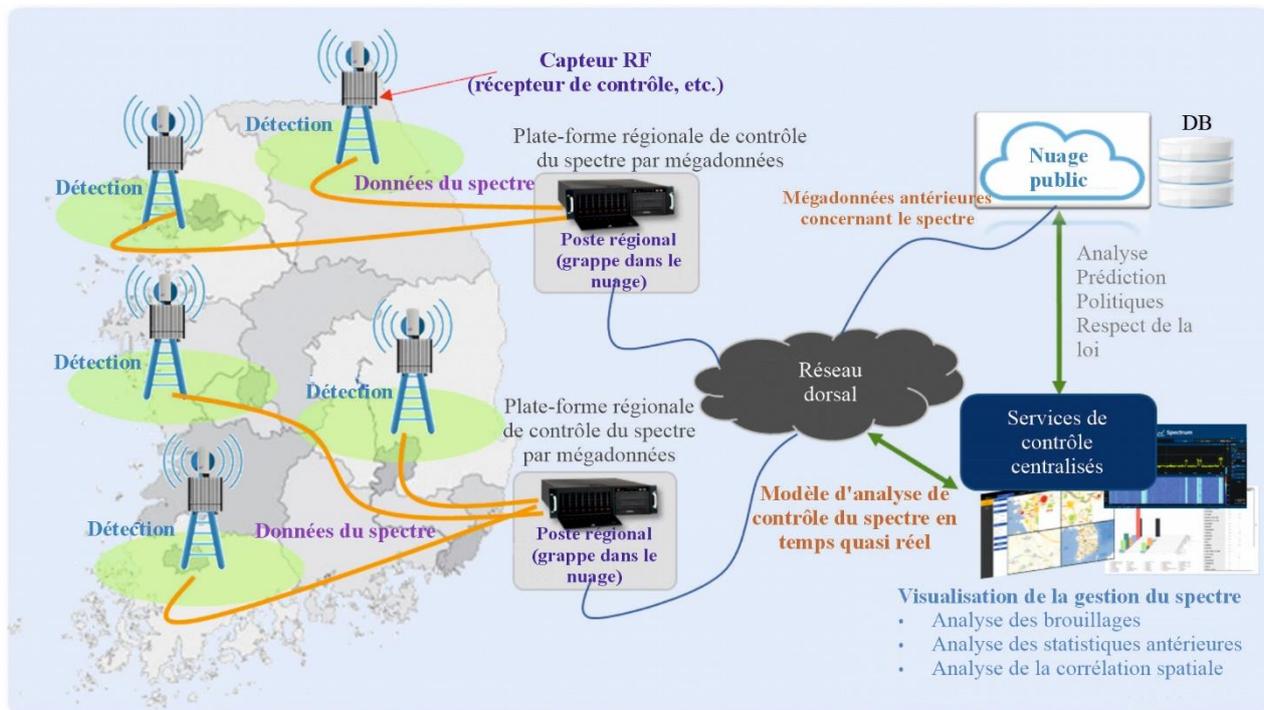


Rapport SM.2542-3

4.3 Couche de collecte RF: exemple de réseau de contrôle du spectre axé sur les mégadonnées

Un réseau de contrôle du spectre axé sur les mégadonnées suppose que le secteur opère un changement de fond pour privilégier des systèmes orientés vers le traitement des données plutôt que les équipements. Le capteur de contrôle RF ne sera plus limité aux fonctions de base de contrôle du spectre mais sera doté d'une intelligence de traitement afin de pouvoir étudier le spectre, cataloguer les signaux, détecter les brouillages et constater les infractions.

FIGURE 4
Réseau national de contrôle du spectre axé sur les mégadonnées



La plateforme de contrôle du spectre axé sur les mégadonnées représentée à la Fig. 4 comporte un réseau de capteurs de contrôle RF capables de prendre en charge les actifs de contrôle existants ainsi que de nouveaux capteurs offrant une couverture améliorée et un traitement intelligent. Un référentiel centralisé de mégadonnées recueille les données de contrôle du spectre, les infractions, les alertes, les données de géolocalisation et l'identité des signaux pour permettre des décisions éclairées aux utilisateurs et des décisions autonomes du système.

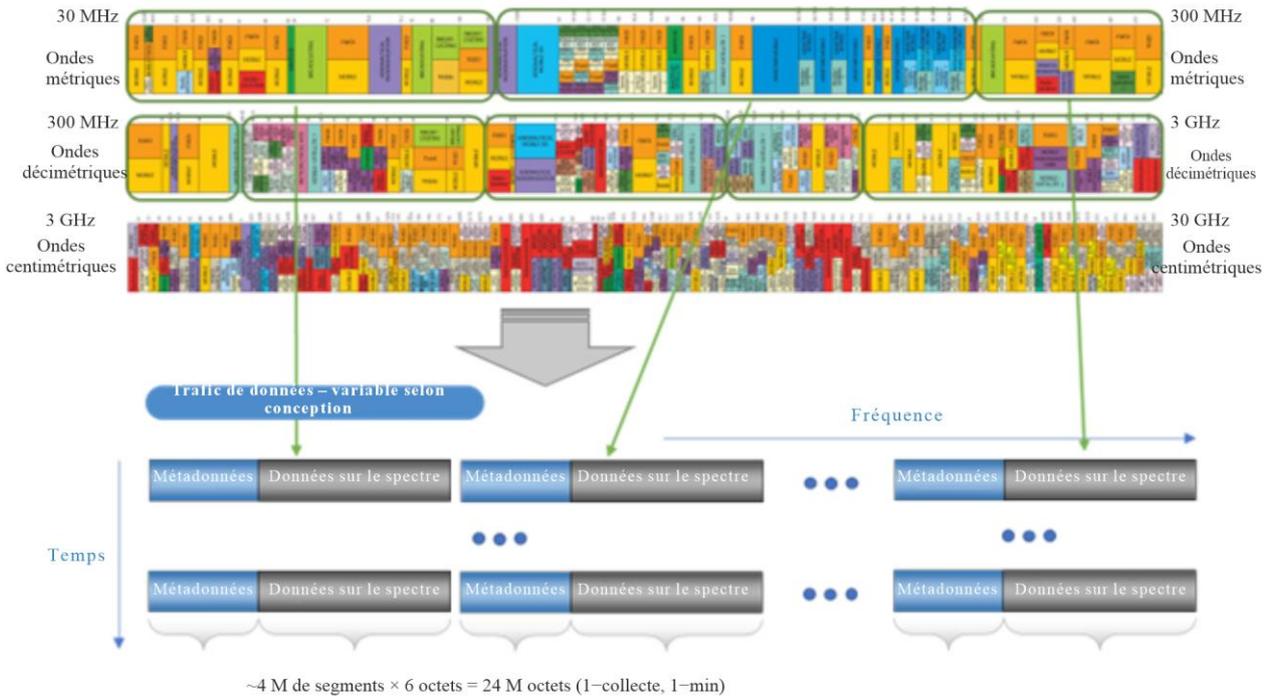
4.4 Couche de stockage des données

Les renseignements figurant dans la base de données centrale doivent être stockés dans des formats normalisés et avec des identifiants spécifiques de façon à pouvoir fusionner les données provenant de plusieurs systèmes de contrôle différents dans une base de données commune.

La solution de contrôle du spectre axée sur les mégadonnées doit impérativement permettre aux techniciens d'effectuer des campagnes coordonnées de mesure du spectre et d'attribuer aux capteurs de contrôle la responsabilité d'une ou de plusieurs fonctions simultanément ou parallèlement. Les techniciens peuvent alors plus facilement élaborer des plans de contrôle pour plusieurs stations et en faire autant à l'échelon régional ou local.

Tous les renseignements stockés dans la base de données centrale le sont au moyen d'identifiants spécifiques ce qui permet de fusionner dans cette base des données provenant de systèmes indépendants ou tiers.

FIGURE 5
Format de données pour la collecte de mégadonnées sur le spectre



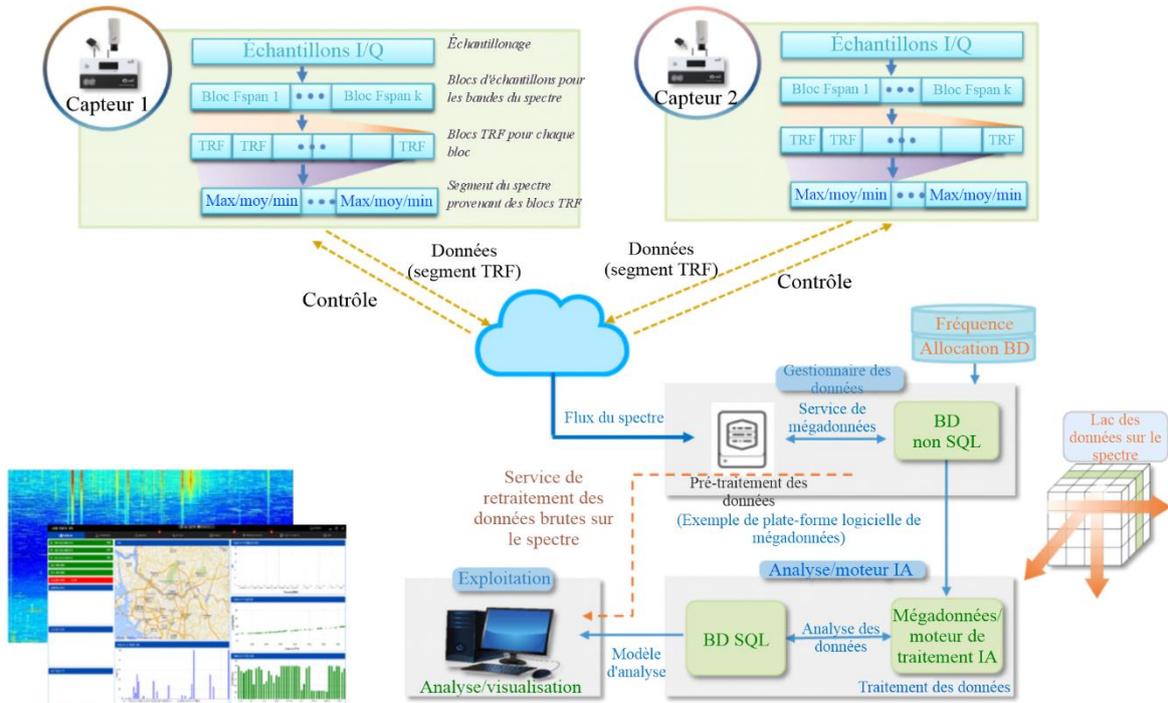
Rapport SM.2542-5

4.4.1 Collecte des mégadonnées (définition des données recueillies)

Les modalités de collecte et de traitement des données, illustrées à la Fig. 5, concernent à la fois les métadonnées et les données du spectre. Les données recueillies sont transformées en données statistiques accumulées sur le spectre, notamment les valeurs maximales, moyennes et minimales, en traitant les données séquentielles de TRF sur le spectre obtenues au moyen des capteurs RF.

FIGURE 6

Exemple d'architecture d'un processus de collecte de mégadonnées sur le spectre par Internet



Rapport SM.2542-6

Comme la Fig. 6 le montre de façon plus détaillée, le système de collecte de données du spectre est configuré pour traiter de façon répétée la totalité de la bande du récepteur de contrôle du spectre (par exemple, de 20 MHz à 6 GHz) et transmettre, après traitement statistique, des données du spectre telles que les traces maximales, minimales et moyennes, pendant la durée de la collecte.

4.4.2 Prétraitement des données

Les paramètres nécessaires aux tâches de contrôle du spectre sont traités dans un format de prétraitement pour l'analyse des mégadonnées sur le spectre par série temporelle, fréquence et emplacement sur la base des données de licence (par exemple) afin d'améliorer la vitesse d'analyse. En outre, le traitement local dans chacun des capteurs RF permet une détection des transmissions illégales et des brouillages en temps quasi réel.

4.4.3 Analyse et visualisation des données

Il est possible de développer les données brutes du spectre et les données prétraitées pour le traitement et la visualisation des données (comme indiqué à la Fig. 7) au moyen de divers logiciels à code source ouvert pour le stockage, l'analyse et le traitement.

Les données du spectre doivent être gérées pour chaque site et permettre une analyse détaillée des tâches de contrôle et d'autres activités par post-traitement. Les données à plus long terme peuvent être stockées à l'aide de méthodes de compression comme les algorithmes de compression et le traitement statistique des données brutes du spectre.

FIGURE 7

Contrôle du spectre avec traitement local pour la détection des transmissions illégales et des brouillages



Report SM.2542-7

4.5 Couche de gestion des données

Les fonctions de gestion du système doivent être d'utilisation conviviale, faciliter la collaboration et permettre l'intégration et l'analyse des données.

Il sera nécessaire d'automatiser les tâches de contrôle, et de regrouper les capteurs en fonction de leurs capacités fonctionnelles et de leur proximité géographique pour permettre la collecte simultanée de données provenant d'un ou de plusieurs capteurs de contrôle des émissions radio afin de recueillir des données fines à l'échelle du pays, de la région, de la ville ou de la localité.

Les méthodes comparatives de contrôle du spectre axée sur les mégadonnées permettent aux techniciens de créer des vues de l'activité du spectre dans l'espace et le temps. Les techniciens effectuent des campagnes coordonnées de mesure du spectre où ils peuvent confier à des capteurs de contrôle la responsabilité d'exécuter une ou plusieurs fonctions simultanément ou parallèlement. Les mesures coopératives sont automatisées en regroupant les capteurs d'après les capacités fonctionnelles et la proximité géographique.

Le recours à des groupes coopératifs de capteurs fonctionnant «en équipe» peut aussi livrer des vues en temps réel de l'activité et permettre également un contrôle actif et des alertes si un changement se produit dans l'environnement. De tels changements peuvent correspondre à une utilisation inattendue, une surutilisation ou une perte de service, y compris en cas de brouillages.

Une interface GUI intuitive permet à l'utilisateur:

- de gérer des équipes pour le contrôle coopératif du spectre;
- d'administrer les tâches;
- d'interroger les résultats (analyse des données);
- de définir la période des mesures;
- de définir la zone géographique et le lieu;

- d'intégrer plusieurs ensembles de données et bases de données pour faciliter l'analyse à l'appui des décisions.

L'intégration de différents systèmes, grâce à l'utilisation d'API, permettra la prise en charge d'outils existant dans le commerce pour la veille stratégique (BI)/l'information sur les bases de données, offrant une interface pour construire des tableaux de bord pour l'accès à des schémas de données. À partir de schémas de données publiés, il est possible d'élaborer de nouvelles vues et perspectives concernant les données. Cela permet également l'intégration de plusieurs jeux de données et des vues correspondantes.

Grâce à ces schémas de données et à l'intégration d'outils BI, les utilisateurs sont en mesure de stocker les données de contrôle et d'en permettre un large accès. Elles peuvent être consultées par plusieurs clients, avec pour chacun une présentation individualisée des données intéressant le consommateur, l'organisation ou le service concernés. Comme on dispose à la fois de données de contrôle du spectre et de données de géolocalisation, il est possible de présenter les résultats des différents jeux de données sur les tableaux de bord de façon particulièrement éclairante et judicieuse. Les jeux de données permettent d'analyser les données relatives à l'occupation du spectre dans telle ou telle bande en les conjuguant avec les informations géographiques. Ces données peuvent être filtrées et réagencées par divers outils de tableau de bord (voir Fig. 8 à 11).

L'Annexe 1 du présent Rapport offre un exemple et un cas d'utilisation de l'IA et des mégadonnées décrivant la pratique de la Corée (République de) en ce qui concerne l'utilisation de l'IA et des mégadonnées pour le contrôle du spectre, y compris une interface GUI intuitive courante.

FIGURE 8
Occupation des fréquences d'après les intervalles horaires

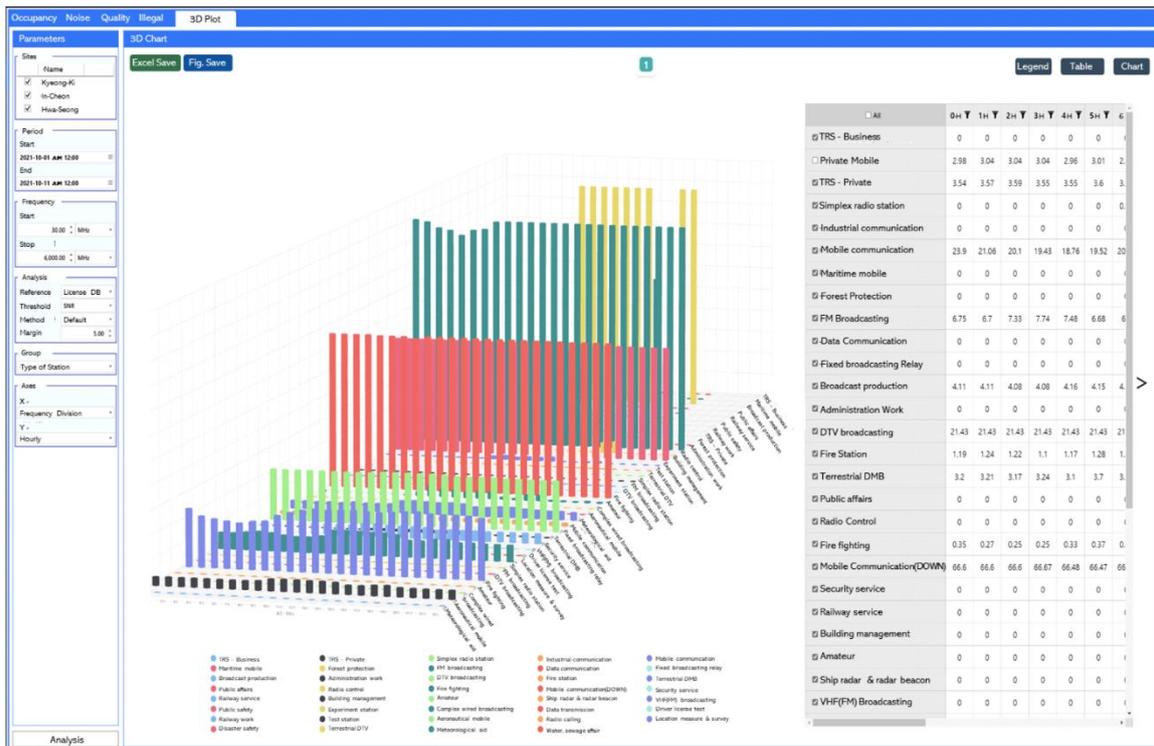
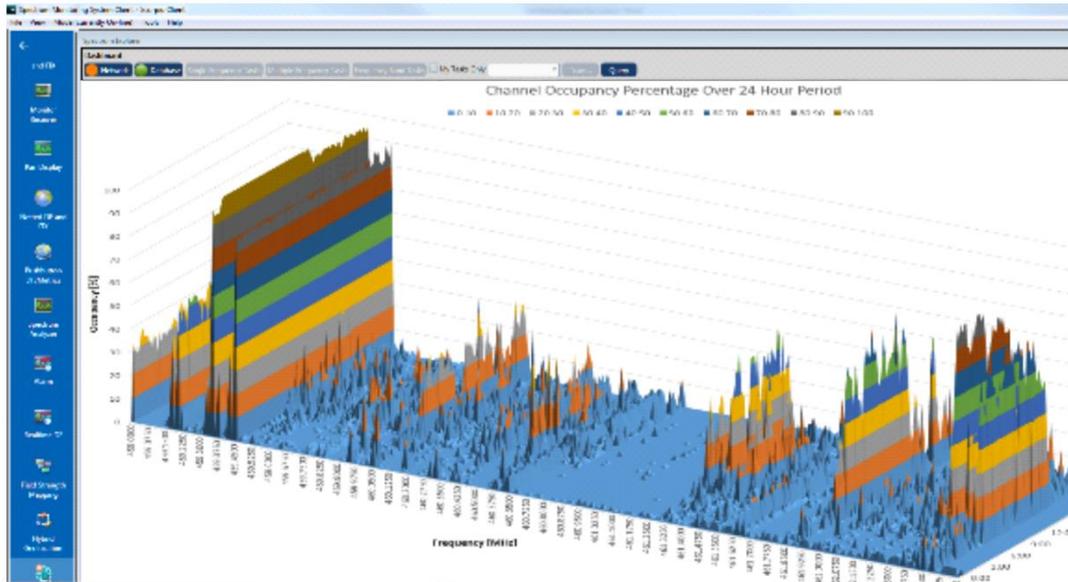


FIGURE 9

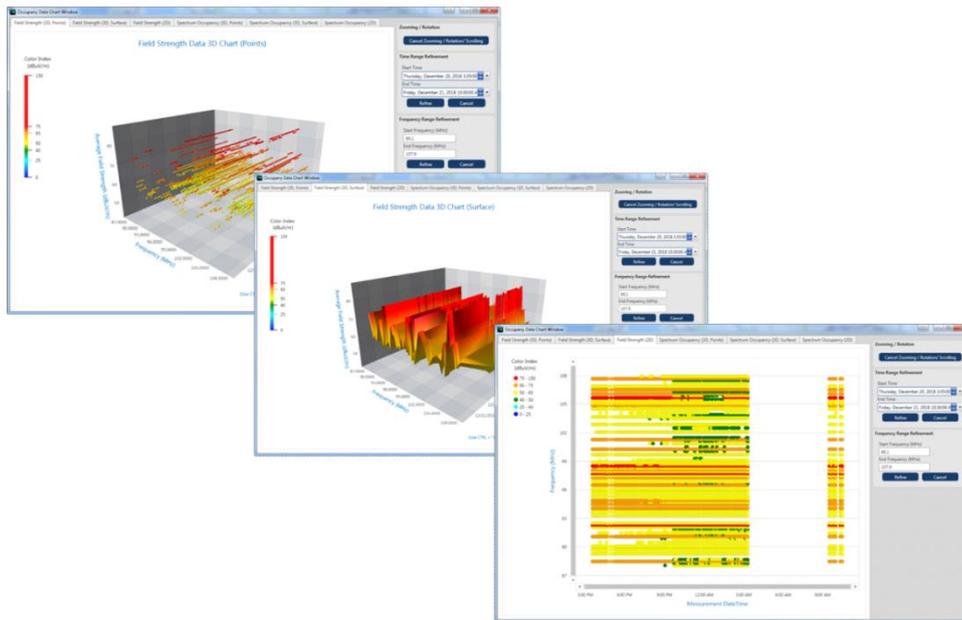
Visualisation en trois dimensions de l'occupation du spectre par bandes de fréquences et plages horaires



Report SM.2542-9

FIGURE 10

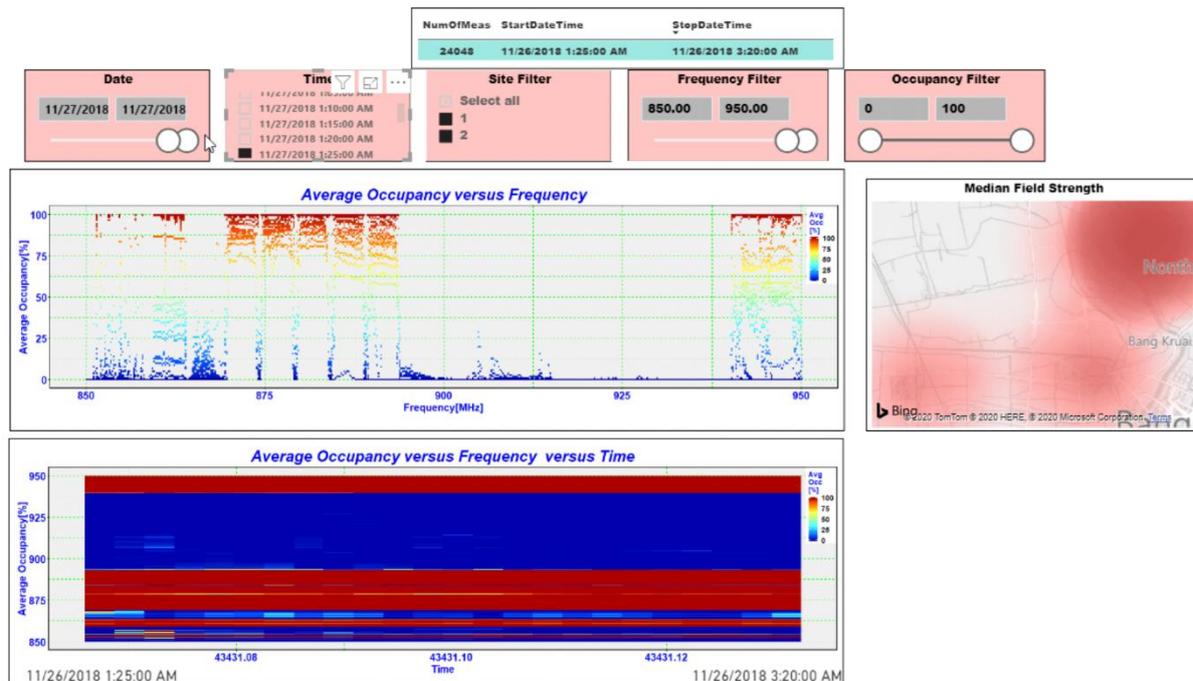
Requête intégrée pour l'évaluation de l'occupation du spectre en présentation à deux ou à trois dimensions



Report SM.2542-10

FIGURE 11

Tableaux de bord pour l'évaluation du spectre par fréquence, période et site



Report SM.2542-11

5 Connaissance du spectre en temps réel axée sur les données par apprentissage RFML

Dans un contexte de progrès des communications et des dispositifs hertziens et de diversité croissante de systèmes hertziens nouveaux et adaptatifs, il importe non seulement de détecter et de classer les protocoles existants, mais aussi de repérer et d'apprendre les protocoles et les systèmes hertziens futurs et de s'y adapter lorsqu'ils sont déployés – notamment ceux des réseaux mobiles/cellulaires, des réseaux IoT, des systèmes autonomes et d'autres technologies émergentes.

Le traitement des signaux par apprentissage RFML peut faire appel aux réseaux neuronaux pour apprendre les caractéristiques des protocoles et des émetteurs RF afin d'en détecter et d'en classer rapidement le type [4]. À mesure que de nouveaux systèmes, services et protocoles hertziens sont adoptés, les systèmes de détection du spectre par RFML peuvent identifier les types d'émissions nouveaux et anormaux, aider à les étiqueter et à les annoter dans les jeux de données, et s'entraîner à les identifier quand ils seront observés par la suite. En outre, le matériel à microprocesseur est de plus en plus optimisé pour une déduction par réseau neuronal économe en coûts et en énergie, et peut être déployé à la périphérie du réseau de contrôle. Le déploiement de l'apprentissage RFML à la périphérie permet une détection en temps quasi réel, en donnant la possibilité de détecter et d'identifier efficacement de nombreux événements du spectre, ce qui offre un moyen efficace d'auditer et d'analyser l'activité sur de larges bandes de fréquences et pour de longues périodes. Il est possible de le faire sans devoir stocker ou transmettre des fichiers de données brutes de séries temporelles I/Q. La Figure 12 présente un schéma d'activité axé sur les données décrivant les interactions de la déduction à la périphérie, de l'analyse des événements, de la conservation des données, du perfectionnement du modèle et du déploiement pour les nouveaux signaux et émissions.

Le contrôle du spectre assisté par l'IA est susceptible de permettre une détection et une reconnaissance des signaux entièrement autonomes, 24 heures sur 24, ainsi qu'une analyse à partir des données de plusieurs sites de contrôle, à l'appui des résultats suivants:

- confirmation de l'utilisation de protocoles et de systèmes sous licence;
- confirmation de l'utilisation active des attributions de fréquences;
- détection, identification et suivi des brouillages;
- évaluation du spectre disponible et suivi permettant l'optimisation;
- activation des informations par interface d'air sur les jumeaux numériques;
- apprentissage rapide de nouveaux types d'émetteurs et de protocoles;
- analyse et surveillance automatisées d'un grand nombre de tendances en matière d'accès au spectre.

6 Résumé

L'on a beaucoup progressé dans l'application de l'apprentissage ML et de l'IA au contrôle du spectre et il existe un grand nombre de documents techniques décrivant l'utilisation, les algorithmes et les limites de cette technologie, ainsi que de solutions logicielles disponibles dans le commerce. Ces changements devraient aboutir à des systèmes de contrôle du spectre plus autonomes ne reposant pas seulement sur une automatisation classique, mais aussi des capacités d'apprentissage intelligent, capables de recueillir et de fusionner des données provenant de sources multiples (données sur le spectre, l'environnement, le trafic, les événements, etc.) et de prendre rapidement les bonnes décisions à l'échelle.

Les réseaux de contrôle distribués denses produisent en temps réel des données d'occupation de qualité permettant de découvrir le spectre disponible dans la zone couverte. Cela peut aussi aider à des prévisions exactes pour l'attribution autonome de fréquences à certaines applications hertziennes comme l'IoT [2]. Parfois, il est possible de colocaliser et codéployer les capacités de détection du spectre avec l'infrastructure du réseau, par exemple dans le matériel de la station de base et de l'unité radiofréquence, et éventuellement, selon qu'il convient et autant que faire se peut, de les coordonner avec les éléments du réseau.

Les systèmes intelligents distribués de contrôle du spectre peuvent améliorer l'efficacité du personnel s'occupant de la réglementation en réduisant l'effort nécessaire pour obtenir les données de contrôle nécessaires pour gérer le spectre et en offrant un éclairage sur les tendances de l'activité du spectre pour un grand nombre de sites, de bandes, de types d'émetteurs et d'échelles de temps dont la gestion n'était pas possible auparavant par d'autres moyens.

Afin de mettre en place un système à grande échelle pour le contrôle du spectre et l'attribution automatisée des fréquences, il est nécessaire d'intégrer les données de détection du spectre par des règles communes et une normalisation des mesures. Il devrait être possible de mesurer les fréquences RF associées pour chaque site à l'aide de capteurs différents et de les distribuer dans un format intégré normalisé afin d'obtenir la confiance résultant d'une analyse du spectre axée sur les mégadonnées. Le recours à des protocoles normalisés pour les jeux de données RF peut être un moyen d'assurer l'interopérabilité et un déploiement, une intégration et une automatisation efficaces de ces systèmes à grande échelle.

7 Références

- [1] Wong, Lauren J., IV William H. Clark, Bryse Flowers, R. Michael Buehrer, Alan J. Michaels et William C. Headley. «The RFML Ecosystem: A Look at the Unique Challenges of Applying Deep

Learning to Radio Frequency Applications» arXiv: Signal Processing (2020): n. pag. Disponible à l'adresse: <https://arxiv.org/pdf/2010.00432>

- [2] Recommandation UIT-R SM.1046 – Définitions du facteur d'utilisation du spectre et de l'efficacité d'utilisation du spectre d'un système radioélectrique
- [3] Baltiiski, P., Iliev, I., Kehaiov, B. et al. «Long-Term Spectrum Monitoring with Big Data Analysis and Machine Learning for Cloud-Based Radio Access Networks». Wireless Pers Commun 87, 815-835 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11277-015-2631-8>
- [4] T. J. O'Shea, T. Roy et T. C. Clancy, «Over-the-Air Deep Learning Based Radio Signal Classification» in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 12, N° 1, p. 168-179, fév. 2018, doi: 10.1109/JSTSP.2018.2797022

Annexe 1

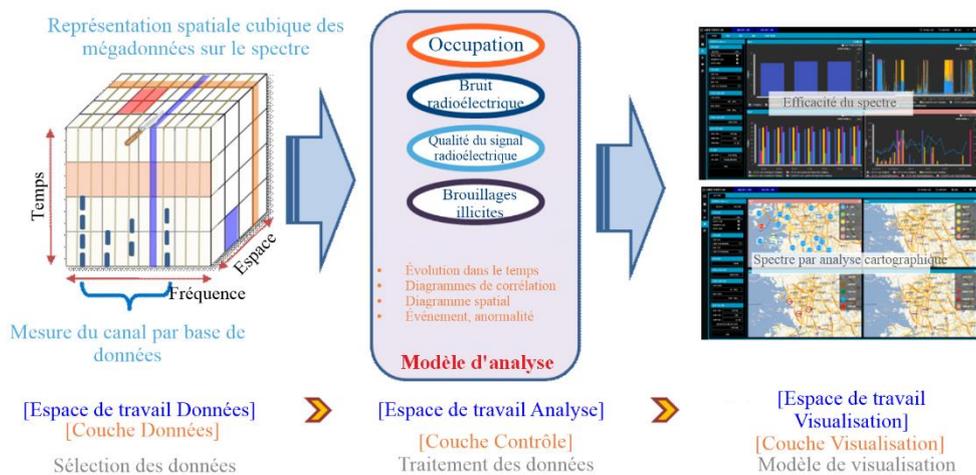
Solution de contrôle du spectre axée sur les mégadonnées et assistée par l'IA en Corée (République de)

La Corée contrôle le spectre par une méthode d'analyse des mégadonnées, en utilisant un logiciel spécifique à cet effet. Le spectre est contrôlé en Corée par trois sites de contrôle formant un système pilote. Chaque serveur en nuage utilise des capteurs couvrant une plage de 30 MHz à 7,5 GHz pour recueillir des données sur le spectre afin de créer une base de données sur le spectre.

Le Gouvernement coréen prévoit d'étendre le système de contrôle du spectre axé sur les mégadonnées à l'ensemble du pays. L'orientation choisie est claire sur le fait que les technologies des mégadonnées et de l'IA (intelligence artificielle) doivent faire partie de la gestion du spectre et que celle-ci doit s'inscrire dans une perspective globale.

FIGURE A1-1

Déroulement du travail d'analyse des mégadonnées sur le spectre



La Figure A1-1 illustre le déroulement du travail d'analyse des mégadonnées sur le spectre, y compris les espace de travail «données», «analyse» et «visualisation».

Les capteurs RF recueillent de façon autonome les données utiles sur le spectre, compte tenu du tableau national d'attribution des bandes de fréquences et de la base de données des licences pour l'utilisation des fréquences radioélectriques. Le système produit des données sur le spectre et en établit, par un processus de TRF, les valeurs statistiques, y compris le maximum, le minimum et la moyenne. Les données produites sur le spectre sont transférées périodiquement vers un serveur de mégadonnées en nuage. Ce serveur enregistre deux formes de données spectrales: des données brutes et des données de prétraitement. Lors de leur enregistrement sur le serveur en nuage, les données spectrales sont stockées sous forme de métadonnées permettant de distinguer chaque paramètre. Les métadonnées se composent de plusieurs variables, indiquées dans le tableau ci-dessous. Ces données peuvent être consultées depuis tout bureau régional et au bureau central. La structure des métadonnées permet aux administrateurs de disposer d'un accès aisé aux données du spectre.

TABLEAU A1-1
Forme des métadonnées

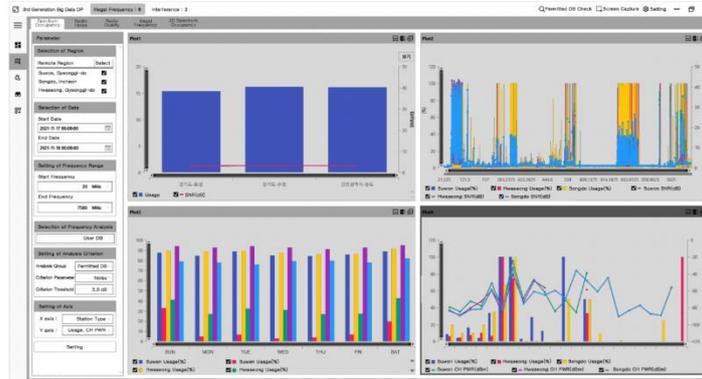
| Rubrique | Catégorie | Type |
|---|---------------------------------------|----------------------|
| Informations sur le capteur et renseignements d'ordre général | Type de capteur | Chaîne |
| | Identifiant du capteur | Entier |
| | Informations de gestion du technicien | Chaîne |
| | Modèle d'antenne | Chaîne |
| | Horodate des mesures de spectre | Décimale |
| | Forme de spectre | Entier |
| | Température du capteur | Décimale |
| | État du capteur RF | Tableau d'entiers |
| | Fuseau horaire de la mesure | Chaîne |
| Informations de mesure | Horodate de la mesure | Chaîne |
| | Longitude de la mesure | Décimale |
| | Latitude de la mesure | Décimale |
| | Hauteur de la mesure | Décimale |
| | État de verrouillage du GPS | Entier |
| | Fréquence de la mesure | Double |
| | Largeur de bande de la mesure | Décimale |
| | Niveau de référence | Entier |
| | Nombre de segments du spectre | Entier |
| | Intervalle de segments du spectre | Décimale |
| Informations de signal | Niveau de bruit moyen | Tableau de décimales |

Les données brutes du spectre représentent le spectre sous une forme continue en temps quasi réel pour la détection des brouillages et des fréquences illégales par l'IA ou d'autres algorithmes. Les données de prétraitement sont utilisées pour une analyse rapide par mégadonnées de tâches de contrôle du spectre comme l'occupation, le bruit du signal radioélectrique et la qualité du signal radioélectrique.

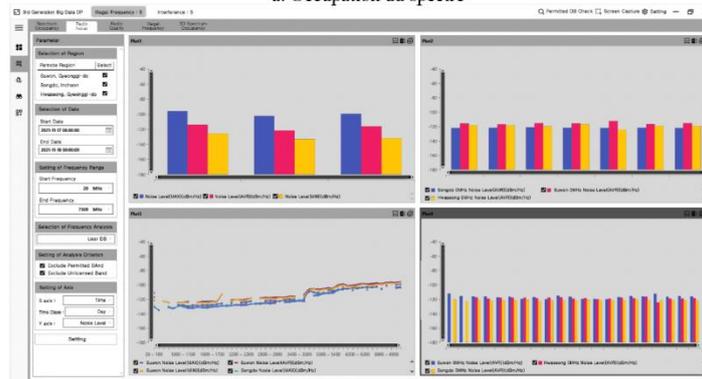
La Figure A1-2 présente des exemples d'affichage concernant l'occupation, le bruit du signal radioélectrique, la qualité du signal radioélectrique, les brouillages et l'analyse des fréquences illégales.

FIGURE A1-2

Principaux facteurs d'analyse de la solution de contrôle du spectre axée sur les données massives

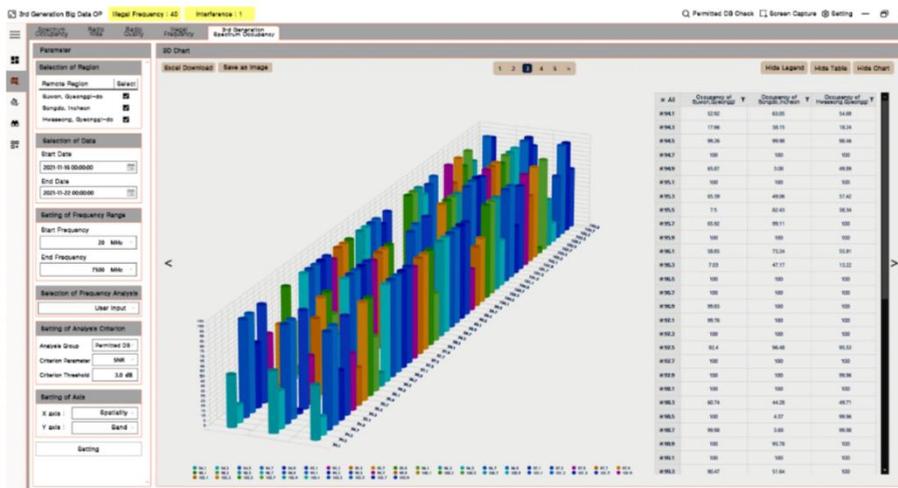


a. Occupation du spectre



b. Bruit du signal radioélectrique

FIGURE A1-3
Analyse tridimensionnelle du contrôle du spectre



Report SM.2542-A1-3

FIGURE A1-4
Analyse des flux de données



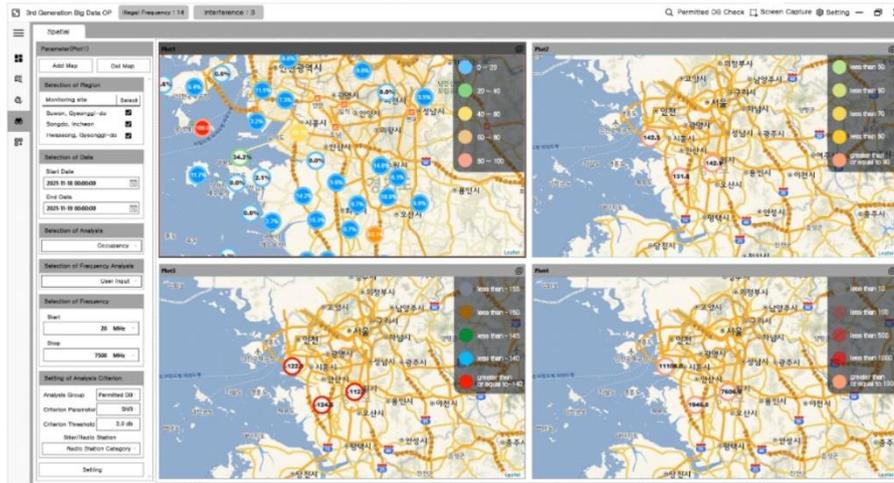
Report SM.2542-A1-4

Le logiciel contrôle les fréquences illégales et le spectre des brouillages en temps réel. L'analyse des données en continu permet un suivi par rapport aux relevés antérieurs où des fréquences illégales ou suspectes ont été détectées.

La méthode d'analyse est illustrée à la Fig. A1-4. Le spectre suspect peut s'observer à une variation soudaine du flux de données. La Figure A1-4 illustre la détection d'une fréquence illégale (trace supérieure) et les résultats d'analyse de cas antérieurs semblables d'utilisation illégale du spectre à des périodes précédentes (trace inférieure). Cette analyse peut être sélectionnée pour la comparaison avec une région particulière à l'époque actuelle en vue d'estimer approximativement l'emplacement de l'émetteur.

FIGURE A1-5

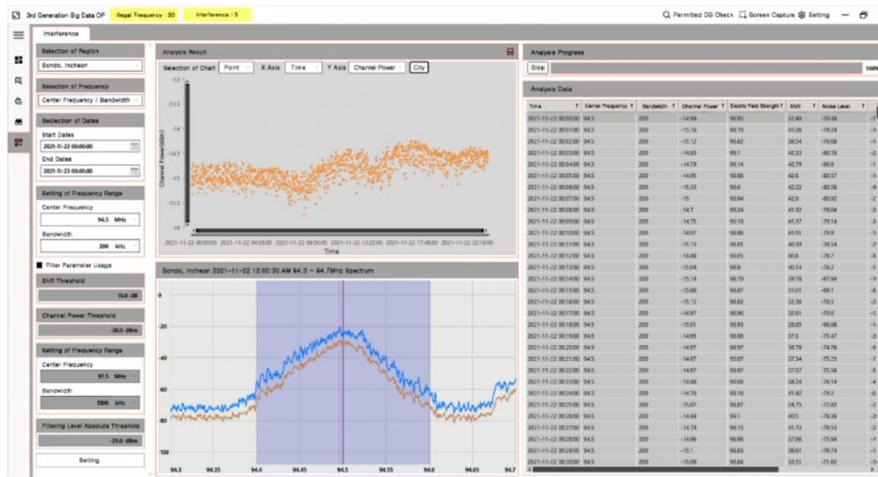
Analyse des données spatiales par contrôle du spectre axé sur les données massives



Report SM.2542-A1-5

FIGURE A1-6

Analyse des données brutes du spectre par une méthode systématique fondée sur les mégadonnées



Report SM.2542-A1-6

La solution de contrôle du spectre axée sur les mégadonnées est capable de visualiser la distribution spatiale de l'occupation du spectre, du bruit des signaux radioélectriques, des fréquences illégales et de l'intensité du spectre. La Figure A1-5 indique la distribution spatiale de ces quatre paramètres, chacun étant représenté sur une carte géographique.

Le système de contrôle du spectre axé sur les mégadonnées est capable d'analyser divers paramètres à partir des données de spectre brutes (sur l'intensité du champ électrique, la puissance dans le canal, le niveau de bruit, etc.). Les Administrations peuvent accéder aux données brutes du spectre par une méthode d'analyse systématique de ces données (dans la BD du spectre) pour obtenir un éclairage complémentaire. Cette fonction est illustrée à la Fig. A1-6.

La solution de contrôle du spectre axée sur les données et assistée par l'IA utilise des techniques de pointe d'apprentissage automatique, notamment un algorithme de détection des anomalies par l'IA. La solution de contrôle du spectre assistée par l'IA est capable d'observer et de détecter des images et des événements de spectre inhabituels en utilisant une méthode d'entraînement de l'IA qui examine

les images du spectre en fonction des résultats d'entraînement. Les méthodes d'entraînement de l'IA recouvrent un apprentissage supervisé, non supervisé ou par renforcement. La solution de contrôle du spectre assistée par l'IA utilise généralement la méthode de l'apprentissage supervisé pour analyser les images de spectrogramme.

En résumé, la solution de contrôle du spectre axée sur les mégadonnées est rendue possible par une plateforme spécialisée qui mesure les IFP importants du spectre que sont notamment l'occupation du spectre, la qualité du spectre, le bruit du spectre et les fréquences illégales. Les Administrations peuvent enquêter sur les incidents importants liés au spectre en se fondant sur l'analyse des mégadonnées.

La solution de contrôle du spectre axée sur les mégadonnées présente des avantages indéniables:

Tout d'abord, une solution de contrôle du spectre axée sur les mégadonnées est capable de traiter de grandes quantités de données de spectre. Les données du spectre sont recueillies et analysées 24 heures sur 24. Elles sont reliées de façon autonome à la base de données nationale sur les licences pour faire l'objet d'un traitement sans intervention humaine. Il est très difficile de contrôler de telles quantités de données par les méthodes conventionnelles.

Ensuite, il est possible d'anticiper les événements futurs du spectre en utilisant un contrôle du spectre axé sur les mégadonnées pour comparer les données antérieures et actuelles sur le spectre. Les Administrations sont en mesure de prévoir des événements futurs du spectre en analysant les mégadonnées du spectre. Grâce à cette analyse des mégadonnées, les administrations peuvent superviser les brouillages prévisibles du spectre d'après les tendances qui ressortent des données antérieures.

Annexe 2

Acquisition mobile de mégadonnées par des véhicules de transports publics pour la cartographie du spectre

Pour les gestionnaires du spectre appliquant un partage dynamique du spectre, il importe de disposer d'une vue d'ensemble réaliste de la couverture du spectre (liaison descendante) et de l'utilisation du spectre dans l'espace (liaison montante). C'est possible en recueillant des données du spectre en beaucoup de lieux différents d'une zone à laquelle on s'intéresse (par exemple, une zone urbaine) et en les représentant sur une carte. Pour cartographier le spectre, on crée une carte thermique continue de la couverture et de l'utilisation du spectre, ce qui nécessite des algorithmes d'interpolation spatiale. Plus les données recueillies sont denses, plus l'algorithme d'interpolation est capable de prédire avec exactitude les niveaux de puissance entre les points de mesure. Pour obtenir cette densité de données en zone urbaine, on a recours idéalement à des véhicules utilisés pour les transports et les services publics (bus, tramways, taxis, camions à ordures, etc.) pour transporter les équipements de mesure RF. Ces véhicules circulent normalement dans les zones importantes de la ville selon un itinéraire qui se prête à la collecte de données spectrales denses, ce qui peut permettre aux Administrations d'économiser des coûts et de la main-d'œuvre. En outre, la densité des données collectées par des véhicules de transports publics dans l'espace et dans le temps ne peut être obtenue en utilisant seulement quelques véhicules de contrôle spécialisés.

La Figure A2-1 illustre les aspects liés à la densité des données. La zone d'intérêt est délimitée par la ligne rouge en pointillés. La précision la plus faible est obtenue en empruntant uniquement l'itinéraire violet adjacent à l'E11. Une précision moyenne est obtenue en empruntant l'itinéraire rouge qui suit

l'E11, la D63 et la D86, puis en tournant à droite jusqu'à l'E11. La meilleure précision et la plus forte densité de données sont obtenues en empruntant l'itinéraire bleu parcourant l'intérieur de la zone en plus de l'itinéraire rouge.

FIGURE A2-1

Autres itinéraires possibles pour obtenir des densités de mesure du spectre différentes



Report SM.2542-A2-1

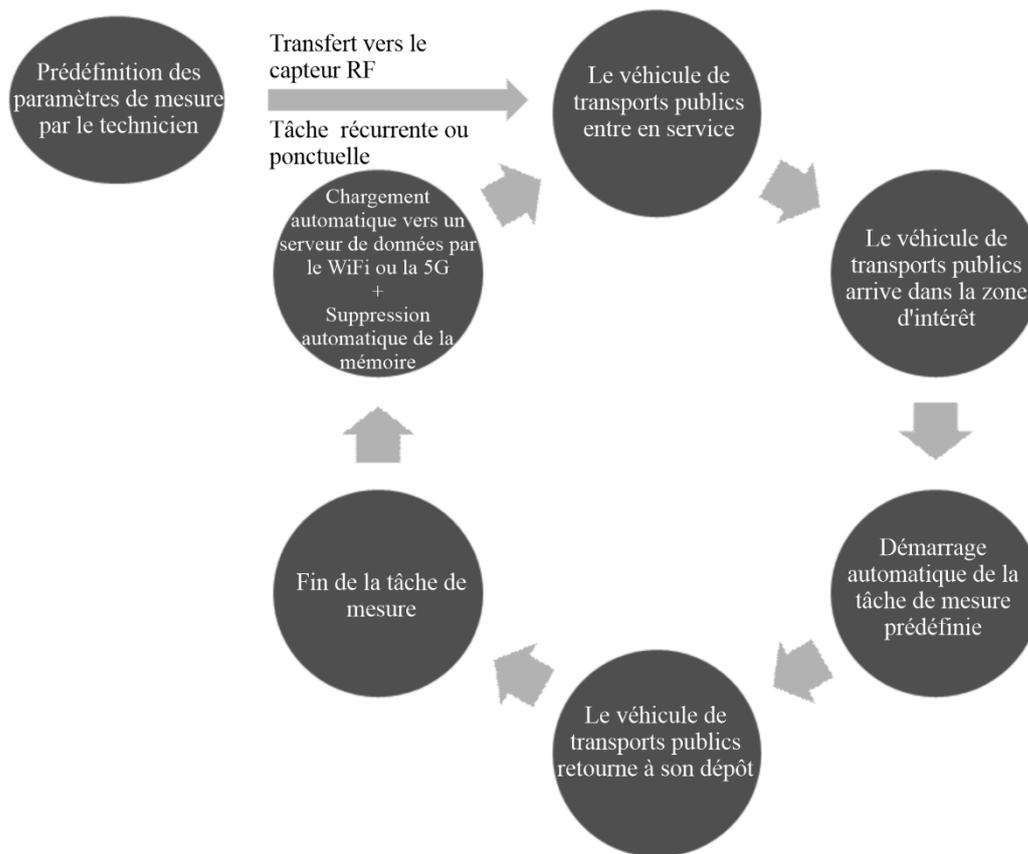
Le capteur et l'antenne RF de contrôle pour applications de transport public doivent présenter les caractéristiques suivantes:

- dimensions compactes;
- mémoire de masse intégrée;
- entrée 12-16 VDC, à alimenter par le véhicule;
- batterie de secours intégrée pour le cas où l'alimentation par le véhicule est perdue;
- routeur cellulaire intégré (LTE, 5G, WiFi);
- antenne compacte large bande.

Outre les exigences matérielles, l'automatisation logicielle est essentielle pour cette application. La collecte et le téléchargement des données doivent être entièrement automatisés, comme le décrit le cercle de processus suivant (Fig. A2-2).

FIGURE A2-2

Processus de mesure du spectre pour les plateformes de contrôle mobiles



Rapport SM.2542-A2-2

Au début du processus, on définit les paramètres de la tâche de mesure. Une tâche de mesure est composée d'une série de paramètres et de caractéristiques à exécuter par le capteur RF si les conditions définies (période et zone, p. ex.) sont remplies. La taille des cellules et la puissance d'émission allant en diminuant et une bonne résolution spatiale étant nécessaire pour que la carte soit significative, l'objectif est de recueillir autant de balayages que possible par intervalle de temps pendant la conduite. Il est recommandé d'effectuer un balayage complet, y compris le temps de resyntonisation, avec une résolution spatiale d'au moins 100 m. Autrement dit, pour chaque 100 m parcourus, une bande ou un canal auxquels on s'intéresse sont revisités. Cela demande des récepteurs de contrôle à grande vitesse. La vitesse de syntonisation minimale pour satisfaire à la condition des 100 m est fonction de la vitesse de conduite, de la gamme de fréquences à contrôler, de la largeur de bande de résolution (RBW) et des paramètres de moyennage de la trace. Le Tableau A2-1 indique les temps de revisite et les vitesses de balayage nécessaires pour un exemple de bandes de fréquences et différentes vitesses de conduite pour remplir la condition de résolution spatiale des 100 m. La vitesse de balayage le temps nécessaire pour resyntoniser le récepteur, étant donné qu'un balayage continu est requis. Si un balayage par liste de fréquences est utilisé, le capteur RF doit être capable d'effectuer toute la liste dans le délai de revisite avant que le balayage suivant puisse commencer.

TABLEAU A2-1

**Vitesse de balayage nécessaire pour une résolution de
100 m en fonction de la vitesse de conduite**

| Vitesse de conduite (km/h) | Temps de revisite nécessaire | Vitesse de balayage pour l'exemple de bande de fréquences 80 MHz – 6 GHz |
|-------------------------------|---------------------------------|---|
| 30 | 12 s | 494 MHz/s |
| 50 | 7,2 s | 823 MHz/s |
| 80 | 4,5 s | 1,32 GHz/s |
| 100 | 3,6 s | 1,64 GHz/s |
| 120 | 3 s | 2 GHz/s |

Pour un balayage ordinaire, la largeur de bande de résolution doit être choisie d'après la largeur de bande du signal la plus réduite attendue dans la gamme de fréquences considérée. Pour un balayage par liste de canaux, une largeur de bande de résolution appropriée peut être sélectionnée pour chaque canal. Un balayage par liste économise de l'espace disque mais peut allonger le temps de revisite dans certains scénarios.

Au fil du parcours du véhicule de transports publics dans la ville, l'intensité de signal reçue par le récepteur de contrôle peut beaucoup varier. Lorsqu'on roule à proximité d'émetteurs puissants, une saturation/surcharge du récepteur peut se produire. Les réglages de gain et d'affaiblissement sont dès lors particulièrement importants. Le contrôle à partir d'un véhicule de transports publics suppose la proximité avec un grand nombre d'émetteurs sur l'itinéraire, et en prévoyant de réduire la sensibilité du capteur RF (en ajoutant un affaiblissement à l'entrée), on obtient une certaine immunité contre les surcharges dues aux signaux puissants.

La quantité de données par capteur RF peut aller de quelques centaines de gigaoctets à un téraoctet de données par jour. Lors d'essais en conditions réelles portant sur 6,5 heures de collecte de données dans une bande de fréquences allant de 80 MHz à 6 GHz, la quantité de données produite a atteint 300 Go. Pour économiser de l'espace disque, il est nécessaire d'automatiser les heures de début et de fin d'enregistrement. On pourra utiliser à cet effet un déclencheur par vecteur de zone (qui tire parti de la localisation GPS du véhicule) ou un déclencheur lié à la commande de contact du véhicule.

Les données collectées sont transférées vers un serveur de données où elles seront utilisées pour établir une carte du spectre avec d'autres mesures issues d'autres véhicules ou de capteurs fixes. Le transfert de données peut être effectué en installant un point d'accès WiFi ou 5G dans le dépôt ou le garage des véhicules, de sorte que le transfert de données par le routeur du capteur RF commence dès que celui-ci se connecte au point d'accès. Pendant l'opération, il est recommandé de diffuser uniquement la trace du spectre en direct, ainsi que les informations relatives à l'état du capteur RF vers un centre de contrôle, plutôt que de transférer les données de mesure brutes par réseau, ce qui utiliserait une grande quantité de bande passante cellulaire.

Le stockage intégré du capteur RF étant limité, il est suggéré d'automatiser la suppression des données une fois achevé le téléchargement vers le serveur.

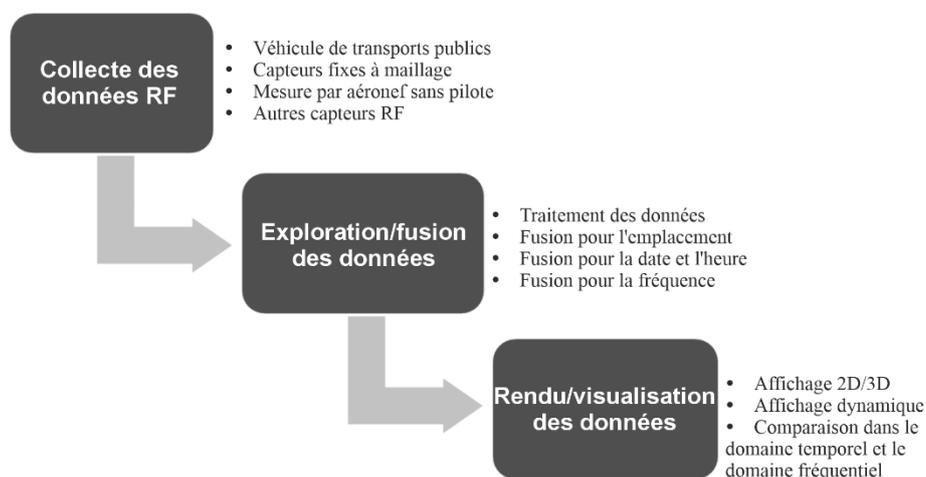
Si un grand nombre de véhicules de transports publics sont équipés de capteurs RF, il est possible d'obtenir une bonne résolution temporelle dans les zones urbaines très fréquentées. Plus les véhicules équipés de matériel RF parcourent souvent les mêmes zones par des itinéraires identiques ou semblables, plus on est en mesure de déterminer les tendances de l'utilisation du spectre dans le temps.

Comme on l'a vu plus haut, les mégadonnées issues de capteurs RF mobiles associés (facultativement) à des stations fixes peuvent être utilisées pour traiter des cartes thermiques continues de la couverture et de l'utilisation du spectre pour les zones urbaines. Après que les données sont collectées et transférées vers un serveur (en nuage), l'exploration et la fusion des données interviennent. Pour que les mesures soient comparables, elles doivent être converties en valeurs d'intensité de champ en tenant compte des affaiblissements sur le trajet du signal et des facteurs d'antenne, ainsi que des paramètres de mesure des différents capteurs RF. Le facteur d'antenne et l'incertitude connexe doivent être caractérisés pour chaque combinaison particulière de type de véhicule et de positionnement de l'antenne. Une carte est produite pour chacun des canaux définis. Pour produire une carte continue, il faut calculer l'interpolation entre les points de mesure. Celle-ci peut aller d'une simple interpolation linéaire à une interpolation fondée sur des modèles de propagation d'ondes. En utilisant pour l'interpolation des cartes de précision contenant des données de terrain et de masque en association avec un modèle de propagation d'ondes, il est possible d'utiliser le plus précisément possible l'intensité de champ dans les intervalles de mesure (là où aucun véhicule ne circulait). Outre l'interpolation géographique, il faudra également regrouper les intervalles de temps. La précision temporelle nécessaire pour l'évaluation peut aller d'une moyenne journalière, ce qui signifie que toutes les données recueillies pendant une journée sont regroupées, à une résolution temporelle de 10 minutes pour les zones très fréquentées. La résolution temporelle est fonction du temps de revisite géographique mesuré par les véhicules de transports publics et les stations fixes dans la zone de mesure.

Après l'exploration et la fusion des données, le rendu/la visualisation des données doit offrir des cartes significatives permettant aux gestionnaires du spectre d'évaluer la situation effective du spectre. La carte de base indique la distribution de l'intensité du champ avec des valeurs en dB μ V/m identifiées par couleur. L'utilisateur peut visualiser la carte de l'intensité de champ pour tous les canaux prédéfinis, et des cartes de bandes de fréquences qui afficheront l'intensité de champ global par bande complète. La Figure A2-3 indique le processus suivi pour établir une carte du spectre.

Si l'outil de cartographie du spectre est connecté à la base de données des émetteurs, les stations autorisées peuvent être affichées avec la carte thermique. En corrélant les cartes portant l'information sur les stations sous licence, le technicien pourra repérer les points chauds qui ne sont pas assignés à une station.

FIGURE A2-3

Déroulement d'une tâche mobile de mesure du spectre

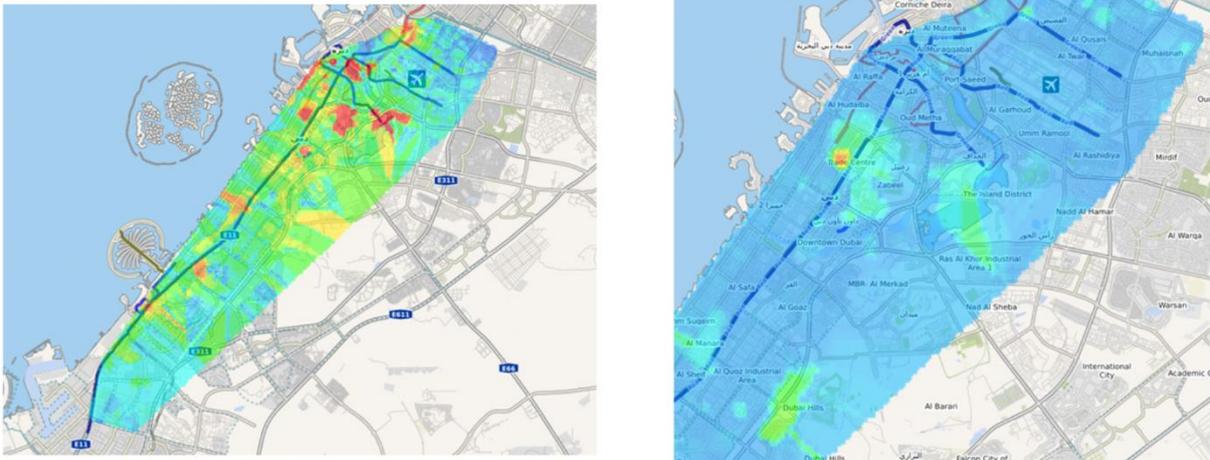
Les cartes d'intensité de champ (Fig. A2-4) peuvent indiquer ce qui suit:

- Cartographie de la couverture:
 - vue regroupée pour l'ensemble de la bande afin d'évaluer la disponibilité totale;
 - vues individualisées pour les différents fournisseurs: quels sont ceux qui offrent la meilleure couverture, et dans quelles zones? Spectre disponible?
 - comparaison avec les calculs de propagation des ondes: la couverture calculée correspond-elle à la couverture mesurée?
- Utilisation des fréquences:
 - cartographie de la liaison montante;
 - évaluer les zones de forte et de faible utilisation, identifier les surcharges;
 - identifier et localiser les cas de brouillage ou d'utilisation illégale du spectre;
 - évaluer les potentialités et mettre en place les données nécessaires à un partage du spectre.

Le système axé sur les mégadonnées devrait proposer des cartes supplémentaires à partir des cartes d'intensité de champ. Il pourra s'agir de cartes de couverture binaires, où l'utilisateur pourra définir un seuil pour lequel les zones se situant au-dessus seront colorées comme étant couvertes et celles se situant au-dessous comme étant non couvertes (voir Fig. A2-5). Les cartes de rayonnement en V/m constituent un autre outil pour la cartographie du spectre axée sur les mégadonnées. Elles permettent aux Administrations de vérifier si les limites de rayonnement sont respectées dans toutes les zones. Ces cartes se prêtent également à la publication afin d'apaiser les craintes au sujet de problèmes de santé liés au rayonnement.

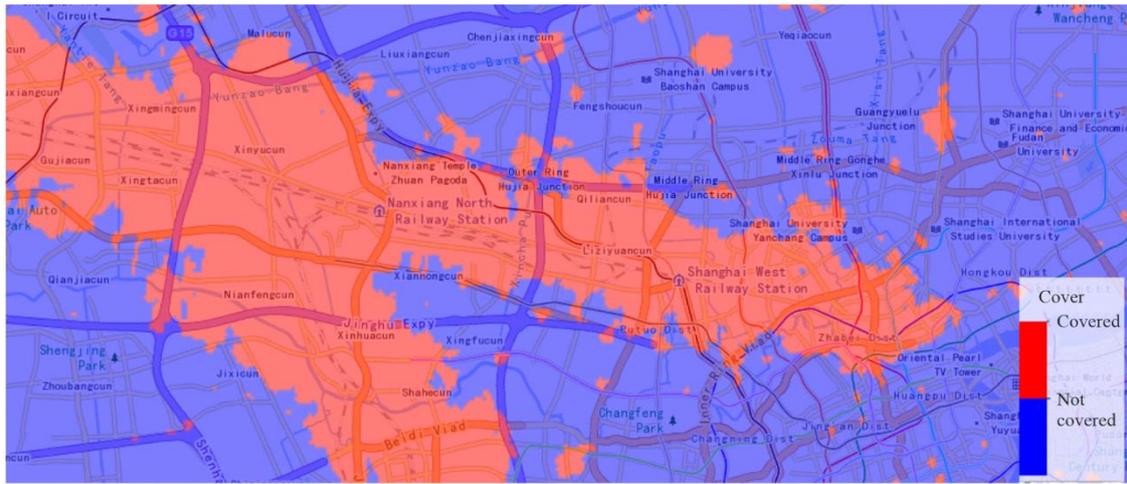
FIGURE A2-4

Cartes de l'intensité du champ



Report SM.2542-A2-4

FIGURE A2-5
Carte de la couverture



Report SM.2542-A2-5