



**Thématique : Sécurité / Défense**

**AI4CS**

## **Règlement du challenge IA**

**Sponsor : Agence Nationale des Fréquences (ANFR)**



# Fiche d'identité du Challenge

## ELEMENTS CLES DU CHALLENGE

**Nom du sponsor : Agence Nationale des Fréquences (ANFR)**

---

**Statut juridique : Etablissement public à caractère administratif**

---

**Type de structure (PME / ETI /GE etc.) : Etablissement public (300 personnes)**

---

## CONTACT POUR LE CHALLENGE

**Cédric Nozet**

---

**Fonction : Responsable du développement de l'innovation et du datalab**

---

**Numéro de téléphone : 01 45 18 72 12**

## RESUME DU CHALLENGE

L'inspection du parc national de plus de 76 000 sites radioélectriques par les agents de l'ANFR contribue à garantir la disponibilité réelle du spectre hertzien pour tous ses utilisateurs et permet d'identifier des usages non conformes en prévention des perturbations et brouillages. Le challenge consiste à cibler et prioriser sur 12 mois les sites à contrôler et les installations sur ces sites nécessitant une attention particulière car susceptibles de révéler le plus d'anomalies. Il est attendu une augmentation de l'ordre de 10 à 15% du taux de détection des anomalies, à effectif constant, par l'utilisation de l'intelligence artificielle pour la planification des contrôles.

# Sommaire

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU CHALLENGE.....	4
2. ETAT DE L'ART DE LA SOLUTION ACTUELLE ET CHALLENGE A RESOUDRE .....	4
3. RESULTATS ATTENDUS.....	5
4. JEUX DE DONNEES A DISPOSITION ET EQUIPE MOBILISEE PAR LE SPONSOR..	6
5. COMPETENCES ET ENGAGEMENTS DU SPONSOR .....	7
6. DEROULEMENT DU CHALLENGE.....	8
7. EXIGENCE ET CRITERES DE SELECTION .....	9
8. RESTITUTION DU CHALLENGE .....	9
9. PERSPECTIVES ET RETOMBEEES POSSIBLES DU CHALLENGE POUR LE LAUREAT .....	9

## 1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU CHALLENGE

L'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) a notamment pour **mission de contrôler l'utilisation des fréquences radioélectriques en France. Elle s'exerce par l'inspection des sites et le contrôle des stations<sup>1</sup> et réseaux radioélectriques.** Elle permet de vérifier, sur le terrain, la conformité des installations par rapport aux configurations des sites radioélectriques et aux assignations de fréquences enregistrées respectivement par le Comité des Sites et Servitudes et le Comité d'Assignation des Fréquences. Cette mission est essentielle pour la sécurité des services radioélectriques et la sécurité des investissements réalisés par les entités publiques et privées pour déployer des services sur le spectre hertzien.

La programmation des inspections suit les orientations fixées par le Directeur du contrôle du spectre et repose actuellement, pour l'essentiel, sur l'expérience et la connaissance d'événements ou de situations susceptibles d'impacter les configurations des sites radioélectriques. Avec cette méthode de programmation, il a été constaté environ 34% d'anomalies lors de contrôles effectués en 2018, un chiffre en hausse d'environ 8% sur les quatre dernières années.

Le ciblage des sites les plus pertinents à contrôler et des éléments nécessitant une attention particulière lors des contrôles devient toutefois **de plus en plus complexe à réaliser par la méthode actuelle** de programmation. En effet, **les cibles potentielles de contrôle, déjà extrêmement nombreuses, ne cessent de croître** : à titre d'illustration, entre 2017 et 2018, augmentation de plus de 4% du nombre de sites dans un parc qui en comprend plus de 76 000, augmentation de plus de 12% du nombre moyen de systèmes<sup>2</sup> par site, augmentation de plus de 17% des demandes de modifications d'installations et augmentation de plus de 2% des assignations de fréquences pour atteindre plus de 434 000 assignations fin 2018. Par ailleurs, étant donné la taille de l'effectif en charge des contrôles (16 ETP), ce sont environ **3 500 stations et 10 000 assignations des fréquences qui peuvent être contrôlées annuellement. Dans ce contexte, le développement d'une nouvelle méthode de planification s'avère être un impératif.**

Le cœur du challenge est la **prédiction de la survenance d'anomalies** qui se répartissent en deux catégories :

- Les irrégularités : Anomalies qui font l'objet d'une notification d'actions correctives à mener ;
- Les non conformités : Anomalies les plus critiques qui font l'objet d'une notification d'actions correctives à mener assorties d'une taxe forfaitaire (cf. annexe A).

**Plus précisément, il s'agira de cibler et prioriser, sur les 12 prochains mois, les contrôles de sites, voire d'équipements<sup>1</sup> de ces sites, les plus susceptibles de révéler le plus grand nombre d'anomalies, en particulier de non-conformités.** Le ciblage et la priorisation seront obtenus par utilisation d'un algorithme d'Intelligence Artificielle (IA) préalablement entraîné avec les résultats de contrôles passés et les configurations matérielles et fréquentielles du parc national de sites radioélectriques. Avec cette nouvelle méthode de programmation permettant un ciblage plus pertinent des contrôles, il est attendu une augmentation de l'ordre de 10 à 15% du taux de détection des anomalies.

## 2. ETAT DE L'ART DE LA SOLUTION ACTUELLE ET CHALLENGE A RESOUDRE

**La méthode actuelle de ciblage et de priorisation des sites à contrôler repose, pour l'essentiel, sur l'expérience et la connaissance d'événements ou de situations** susceptibles d'impacter l'état des sites radioélectriques. Elle doit donc **être mieux outillée pour orienter les contrôleurs** vers les sites et les

<sup>1</sup> Un site comprend une ou plusieurs stations. Une station désigne l'ensemble des systèmes (technologies) et équipements d'un même exploitant.

<sup>2</sup> Un système correspond à une technologie de radiocommunication associée, pour certaines d'entre elles, à une bande de fréquences données (LTE 800 MHz, LTE 1800 MHz, LTE 2600 MHz par exemple).

éléments présentant, sur une période à venir de 12 mois, un potentiel élevé de survenance d'anomalies, en particulier de non-conformités.

**Une analyse fine de l'historique des anomalies et des sites** sur lesquels elles ont été constatées, **et une comparaison approfondie** entre les sites dont les résultats des contrôles ont été positifs et ceux pour lesquels ils ont été négatifs **s'avèrent pour cela indispensable**. De plus, **étant donné le nombre très élevé de combinaisons possibles** entre les types de systèmes<sup>3</sup> implantés sur les sites, les caractéristiques de leur installation (hauteurs d'antennes, azimuts, fréquences, puissances, dates de mise en service) et leurs utilisateurs<sup>4</sup>, **une modélisation des corrélations entre ces combinaisons et les anomalies constatées s'avère trop complexe à réaliser**.

**Le clustering est une autre approche intéressante** à investiguer. **La constitution de clusters** représentatifs de situations d'anomalies et de clusters représentatifs de configurations types de sites existants qui puissent être rapprochés **pour obtenir une liste de sites à contrôler utilisable opérationnellement** représente toutefois une **difficulté qui reste à résoudre**. En particulier, cette difficulté réside dans la constitution de clusters ni trop généralistes, ni trop spécifiques, le premier cas conduisant à l'obtention de listes de sites à contrôler trop importantes et le second à la quasi impossibilité de rapprocher clusters d'anomalies et clusters de sites existants.

Du fait de l'identification complexe des paramètres permettant de définir des listes de sites le plus susceptibles de révéler un nombre significatif d'anomalies et de la volumétrie importante de données disponibles (10 années d'historique de résultats de contrôles de sites et de configurations matérielles et fréquentielles des sites contrôlés), **le recours à l'apprentissage machine, et en particulier l'apprentissage profond, apparaît comme une piste prometteuse non explorée à ce jour par le Datalab**.

**Trois points particuliers d'attention sont d'ores et déjà identifiés** pour la mise en œuvre de cette approche.

**Un réapprentissage régulier est nécessaire du fait des évolutions dans le temps des réseaux** (déploiement de la 5G et du GSM-R, réaménagement de bandes de fréquences notamment 700 MHz, 800 MHz et 3,5 GHz, ...) pouvant impacter les types d'anomalies constatées. En première approximation, une période de 12 mois semble appropriée pour des réapprentissages réguliers. Cette période pourra toutefois être affinée au cours des travaux.

**La constitution des bases d'apprentissage devra prendre en compte des phénomènes régionaux et temporels**, comme le déploiement par plaque géographique et dans le temps de la TNT et de la 4G. Sans prise en compte de ces phénomènes, des biais pourraient être introduits dans les bases d'apprentissage.

**La réapparition de mêmes sites à contrôler d'une année à l'autre est un phénomène possible** en recourant à une analyse statistique des configurations susceptibles de révéler le plus grand nombre d'anomalies. Ce phénomène **devra être maîtrisé**, par exemple par une prise en compte des systèmes inspectés dans les années passées et non modifiés depuis.

### 3. RESULTATS ATTENDUS

**Il est attendu, en sortie des traitements, une liste de sites, et préférentiellement d'équipements sur ces sites, nécessitant une attention particulière des contrôleurs car ayant la plus forte probabilité de révéler des anomalies sur les 12 prochains mois**. Ces résultats devront permettre un taux de détection des anomalies 10 à 15% supérieur par rapport à celui actuel. Ces sites devront être répartis par régions

<sup>3</sup> 57 types différents de systèmes référencés (GSM 900, GSM 1800, hertziens, TNT, radiodiffusion AIS, BLR 26 GHz, BLR 3 GHz, etc).

<sup>4</sup> Plus de 5000 utilisateurs référencés.

ou par zones géographiques d'intervention des différents services régionaux (SR) de l'agence. Comme mentionné au chapitre précédent, il est attendu que la liste de l'année n soit différente de celle de l'année n-1 pour les systèmes ayant fait l'objet d'un contrôle en année n-1.

En fonction des potentialités des bases d'apprentissage qu'il sera possible de réaliser et des algorithmes d'IA qu'il sera possible d'utiliser, **plusieurs niveaux de résultats peuvent être envisagés.**

Par niveau d'intérêt croissant :

- identification de sites à contrôler sur les 12 prochains mois par région ou zone géographique d'intervention de chaque SR ;
- identification et priorisation de sites à contrôler sur les 12 prochains mois par région ou zone géographique d'intervention de chaque SR ;
- identification et priorisation de sites à contrôler sur les 12 prochains mois par région ou zone géographique d'intervention de chaque SR, avec, pour chaque site, les éléments nécessitant une vigilance particulière ;
- identification et priorisation de sites à contrôler sur les 12 prochains mois par région, avec, pour chaque site, les éléments nécessitant une vigilance particulière et les anomalies potentielles avec le niveau de confiance dans la survenance de chacune.

La priorisation pourra, par exemple, être établie en fonction d'un critère plus ou moins fin de volume d'anomalies potentielles, dont celui de non-conformités, et d'un critère de prévision d'échéances temporelles avec un pas de 1 mois ou d'un trimestre sur une période de 12 mois.

**En fonction de la complexité de réalisation, dans le cadre d'un prototypage, le chaînage des traitements ne sera pas nécessairement automatisé.** Le fonctionnement de bout en bout devra toutefois avoir été testé et la pertinence des résultats produits prouvée à partir de bases de tests qui auront été créées en parallèle des bases d'apprentissage.

Parmi les résultats, il **est également attendu des recommandations sur la constitution du jeu de données qui alimentera régulièrement l'algorithme d'IA** utilisé pour la mise à jour de ses paramètres **ainsi que sur la période de temps** que les données du jeu doivent caractériser.

## 4. JEUX DE DONNEES A DISPOSITION ET EQUIPE MOBILISEE PAR LE SPONSOR

Les **données** qui peuvent être mises à disposition sont :

- Dans l'application Fichier de Contrôle du Spectre (FCS) :
  - o un **historique de près de 10 ans des résultats des contrôles**<sup>5</sup> comprenant les actions réalisées et les anomalies constatées<sup>6</sup> codifiées suivant une nomenclature stable ;
  - o le **descriptif des configurations des sites radioélectriques contrôlés** sur les 10 dernières années extrait de l'application STATIONS au moment des contrôles ;
- Dans l'application STATIONS :
  - o le **descriptif des configurations de l'ensemble de plus de 76 000 sites radioélectriques du parc national, avec une historisation d'« attributs »**<sup>7</sup>, sur environ **10 ans également**, faisant notamment l'objet de contrôles (un attribut est, par

<sup>5</sup> Cet historique représente environ 40 000 contrôles de stations (1 contrôle comprenant la vérification de plusieurs éléments) et 90 000 contrôles de fréquences.

<sup>6</sup> Le nombre d'anomalies relevées chaque année varie. Sur 10 ans, il est de plus de 64400 anomalies (61% concernant des fréquences et 39% concernant des stations), dont 37230 non-conformités (66% concernant des fréquences et 34% concernant des stations).

<sup>7</sup> Une liste précise des attributs historisés pourra être communiquée au Lauréat au lancement des travaux. Un projet piloté par le service informatique de l'agence est en cours d'exécution sur ce sujet.

exemple, les « systèmes techniques » présents sur un site, comme des antennes AIS, FM, TNT, GSM, UMTS, LTE, etc.) ;

- Dans l'application Fichier National des Fréquences (FNF) :
  - o les **fréquences utilisées par les systèmes en émission** implantés sur l'ensemble des sites radioélectriques **avec une historisation sur environ 10 ans**.

Les données des contrôles sont saisies dans FCS au maximum un mois après qu'ils aient été effectués. Les données relatives aux configurations des sites dans STATIONS et aux fréquences dans FNF sont respectivement mises à jour chaque jour et chaque mois. Les données de chacune de ces trois applications sont hébergées sur une base de données Oracle distincte.

Un extrait de STATIONS est régulièrement mis en ligne en open data sur [www.data.gouv.fr](http://www.data.gouv.fr). Il est consultable à l'adresse <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-sur-les-installations-radioelectriques-de-plus-de-5-watts-1/>.

**Les données peuvent être requêtées dans ces applications via des outils existants** dans lesquels des requêtes types ont été développées. La création de requêtes spécifiques, voire l'export complet de tables peuvent également être demandés. **Les résultats des requêtes seront mis à disposition du Lauréat sous forme de fichiers csv.**

**Les données concernant les fréquences exactes utilisées** par les systèmes et celles concernant **les résultats des contrôles sont considérées comme « confidentiel industrie »**. Leur mise à disposition devra donc **faire l'objet d'une convention entre l'ANFR et le lauréat** précisant notamment les usages autorisés et l'engagement de destruction, par le lauréat, des jeux de données dont il dispose.

**L'équipe du Datalab**, actuellement composée d'un chef de projet innovation responsable du Datalab, d'un datascientist et d'un ingénieur BigData en alternance, **sera mobilisée sur le challenge. Le chef de projet innovation sera le référent du Lauréat.**

**Des appuis métiers seront, en outre, apportés** par le responsable de la coordination de l'activité de Contrôle de conformité ou son adjoint, et par le directeur de la Gestion des fréquences ou son adjoint.

**Le service informatique pourra intervenir en support** pour la réalisation de requêtes particulières non disponibles parmi celles déjà proposées aujourd'hui et pour l'approvisionnement éventuel de machines virtuelles pour des calculs.

## 5. COMPETENCES ET ENGAGEMENTS DU SPONSOR

L'ANFR est un établissement public de l'État à caractère administratif placé auprès du ministère chargé des communications électroniques. Elle exerce trois missions principales en concertation avec les affectataires de fréquences : la planification nationale et internationale du spectre, la gestion des stations radioélectriques et le contrôle de l'utilisation des fréquences.

**L'ANFR dispose, du fait de ses missions historiques, d'une expérience, de compétences et d'outils dans le traitement de très grands volumes de données. En 2018, l'ANFR s'est dotée d'un « Datalab »,** rattaché à la Direction de la Gestion des Fréquences<sup>8</sup>. Le Datalab dispose de compétences en BigData. L'utilisation d'algorithmes d'Intelligence Artificielle (IA), et en particulier d'apprentissage profond, reste toutefois un champ dans lequel le Datalab doit développer un savoir-faire.

**Il convient de noter que le challenge proposé s'inscrit ainsi dans une priorité de l'agence et dans une démarche d'innovation et d'exploration de nouvelles technologies** pour la réalisation des missions

---

<sup>8</sup> La Direction de la Gestion des Fréquences est la direction métier gérant le patrimoine de données le plus important de l'agence (sites radioélectriques, assignation des fréquences des réseaux terrestres et mobiles maritimes, identifiants radiomaritime et radioamateur, etc.).

de l'agence entreprise depuis deux ans. La direction de l'agence portera donc un regard attentif au bon déroulement du challenge et aux résultats obtenus susceptibles d'accroître la productivité des contrôles dans un contexte de densification des sites, des systèmes hébergés sur ceux-ci et d'augmentation de la complexité des configurations des installations.

## 6. DEROULEMENT DU CHALLENGE

Il est envisagé un challenge d'une durée cible de 8 mois qui se déroulera en 4 phases.

### Phase 1 : Compréhension du contexte métier

Mois 1            Prise de connaissance des processus métiers du contrôle et des attendus métier. Visite possible d'un service régional pour présentation des activités de contrôles. Signature d'une convention pour la mise à disposition de données.

### Phase 2 : Compréhension des données et premiers tests pour évaluation de faisabilité

Mois 2 et 3      Premières transmissions de jeux de données. Echanges sur leur contenu et leur exhaustivité par rapport à l'objectif. Eventuels ajustements des jeux de données. Première identification des algorithmes à tester, des critères d'apprentissage et premiers tests pour vérification de faisabilité.

### Phase 3 : Travaux algorithmiques approfondis

Mois 4 et 5      Constitution des jeux complets de données d'apprentissage et de tests. Essais de différents algorithmes d'IA. Itérations avec l'agence ANFR pour éventuelles adaptations des jeux de données mis à disposition et analyse de la pertinence des résultats obtenus.

### Phase 4 : Intégration, test grandeur nature et présentation des résultats

Mois 6 et 7      Chaînage complet des traitements (pas nécessairement automatisé) pour l'obtention des résultats exploitables opérationnellement par les contrôleurs et lancement d'un test de planification de contrôles avec eux. Réalisation de quelques contrôles sur la base de la planification proposée.

Mois 8            Analyse des résultats de contrôles effectués sur recommandation des algorithmes, ajustements éventuels des modèles. Présentation du POC (Proof Of Concept) et démonstration par le Lauréat aux équipes de direction du Contrôle du spectre et de la Gestion des fréquences et à la direction générale de l'agence.

Une augmentation du taux de détection de l'ordre de 10 à 15% d'anomalies supplémentaires est l'objectif bas attendu. Le taux d'anomalies constatées sur les éléments contrôlés est de 34% en 2018.

**Une réunion de lancement et environ trois comités de pilotage** seront organisés. Les comités de pilotage se tiendront à l'issue de la phase 2, de la phase 3 et des contrôles effectués sur la base de la planification proposée par la solution d'IA. **En dehors de ces rendez-vous formels, il est attendu une proximité entre l'équipe du Lauréat et celle de l'agence** impliquée dans le challenge.

**A l'issue de la phase 2**, il sera attendu **une liste argumentée de quelques algorithmes** d'IA qui feront l'objet des travaux approfondis de la phase 3 ainsi que **des spécifications pour la constitution par l'agence des bases d'apprentissage et de tests** qui seront utilisées pendant la phase 3.

**A l'issue de la phase 3**, il sera attendu **un choix argumenté d'algorithmes qui seront intégrés dans la chaîne finale de traitements** permettant d'obtenir la liste des sites/équipements de ces sites à contrôler prioritairement sur les 12 prochains mois. On s'assurera que les éléments de cette liste ne se répètent pas d'une année à l'autre si les contrôles proposés ont été effectués.

Suivant les résultats obtenus, il sera décidé de la poursuite du projet lors des comités de pilotage en fin de phases 2 et 3.

## 7. EXIGENCE ET CRITERES DE SELECTION

- PME de préférence ;
- Expérience avérée et confirmée dans le développement à façon de solutions intégrant des algorithmes utilisés pour l'apprentissage machine, et notamment pour l'apprentissage profond ;
- Capacité avérée à conseiller et à transférer des connaissances ;
- Expérience ou sensibilité à la gestion du changement lié à la numérisation des processus métier ;
- Connaissance des infrastructures de télécommunication ou de diffusion hertzienne appréciée.

## 8. RESTITUTION DU CHALLENGE

**Une séance de restitution finale des travaux et de démonstration** sera organisée avec la direction de la gestion des fréquences, la direction du contrôle du spectre et la direction générale de l'agence.

**Un livrable présentant les travaux réalisés et les résultats obtenus sera rédigé par le Lauréat et remis à l'agence.**

## 9. PERSPECTIVES ET RETOMBÉES POSSIBLES DU CHALLENGE POUR LE LAUREAT

Engagée dans une démarche active d'innovation dans le domaine du numérique, **l'ANFR travaille avec des PME et des startups en mode partenarial et les associe régulièrement à différents événements** : conférence Spectre et Innovation, salon Vivatech, échanges avec les homologues de l'agence à l'international, Hackathons, ...

L'agence ne disposant pas en interne d'une équipe de développement logiciel, **une pérennisation de la coopération de l'ANFR avec le lauréat est une option réelle à l'issue du challenge**, dans le cadre permis par le code des marchés publics<sup>9</sup>. Différents scénarii pourront être étudiés, comme l'achat du code source ou d'une licence.

Par ailleurs, le contrôle des équipements de radiocommunication des navires astreints dont l'agence a la charge pose une problématique similaire à celle des contrôles de sites radioélectriques terrestres et peut donc offrir d'autres perspectives de coopération.

**Des transpositions** de la preuve de concept qui sera développée au cours du challenge sont possibles **auprès de différents acteurs et secteurs d'activité** :

- Pour l'inspection de sites radioélectriques : **homologues de l'ANFR à l'international, opérateurs de téléphonie mobile et des opérateurs de sites**, comme TDF et Towercast ;

---

<sup>9</sup> Ce cadre permet notamment :

- un marché négocié sans publicité ni mise en concurrence préalable jusqu'à 25 000 euros hors taxes et un marché à procédure adaptée à partir de 25 000 euros hors taxes jusqu'à 144 000 euros hors taxes pour les services ;
- pour des « achats innovants », des marchés négociés sans publicité ni mise en concurrence préalable d'un montant cumulé inférieur à 100 000 euros hors taxes pour satisfaire à un même besoin.

- Pour les contrôles de conformités d'installations : **entreprises privées industrielles et leurs prestataires** (comme Bureau Veritas), **entités publiques** (comme les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL)).

Challenges IA – règlement challenge :



## ANNEXE A : Classification des écarts

Caractérisation des anomalies relevées lors des contrôles des sites. Elles sont établies automatiquement par l'application de gestion FCS, par comparaison entre les données contenues dans les bases notariales et le relevé effectué sur site.

Libellé des anomalies	Irrégularité	Non-conformité
Hauteur d'antenne supérieure de 5 m et inférieure ou égal à 15 m par rapport à celle autorisée par la COMSIS <sup>10</sup>	IR	
Hauteur d'antenne supérieure de 15 m par rapport à celle autorisée par la COMSIS		NC
Ecart entre l'azimut mesuré et l'azimut autorisé par la COMSIS supérieur à 5 degrés (en plus ou en moins) et inférieur à 30°	IR	
Ecart entre l'azimut mesuré et l'azimut autorisé par la COMSIS supérieur à 30 degrés (en plus ou en moins)		NC
Ecart entre la position géographique mesurée et la position autorisée par la COMSIS supérieur à 3 secondes (en plus ou en moins)		NC
Utilisation de fréquences dans une bande non déclarée à la COMSIS		NC
Station en fonctionnement non connue de la COMSIS ou assignation en service non connue de la CAF		NC
Création ou modification d'une station ou d'une assignation refusée respectivement en COMSIS ou en CAF et constatée en service		NC
Création ou modification d'une station mise en différé par la COMSIS et constatée en service		NC
Largeur de bande supérieure à celle autorisée <sup>11</sup>		NC
Assignation déclarée au FNF et non émise par l'émetteur.	IR	
Station déclarée en COMSIS et non présente sur le site ou n'émettant pas	IR	
Mutualisation d'un aérien / accueil d'un aérien mutualisé	IR	

<sup>10</sup> COMSIS : Comité des Sites et Servitudes

<sup>11</sup> Seule l'utilisation d'une largeur de bande supérieure à celle autorisée peut faire l'objet d'une notification de non-conformité avec Taxe. En aucun cas une taxe ne sera émise pour l'utilisation d'une largeur de bande inférieure.