



PROGRAMME OF THE  
EUROPEAN UNION



EGNOS

NAVIGATION MADE IN EUROPE

# EUROPEAN RADIO NAVIGATION PLAN 2023



La présente publication est un document de travail des services de la Commission européenne, rédigé par la DG DEFIS en coopération avec le Centre commun de recherche (JRC), le service de la Commission européenne chargé de la science et de la connaissance.

Les avis exprimés dans le présent document sont ceux des services de la Commission et ne sauraient en aucune circonstance être considérés comme représentant la position officielle de la Commission européenne. Les informations contenues dans le présent document sont destinées aux États membres et aux entités traitant de technologies PNT (positionnement, navigation et synchronisation).

Ni la Commission européenne ni aucune personne agissant au nom de la Commission n'est responsable de l'usage qui pourrait être fait de la présente publication. Pour toute information sur la méthodologie et la qualité des données utilisées dans cette publication dont la source n'est ni Eurostat ni un autre service de la Commission, les utilisateurs doivent contacter la source référencée. Les désignations employées et la présentation du contenu sur les cartes n'expriment en aucun cas l'avis de l'Union européenne au sujet du statut juridique de pays, de territoires, de villes ou de zones ou de leurs autorités, ni au sujet de la délimitation de leurs frontières ou de leurs limites.



La politique de réutilisation de la Commission européenne est mise en œuvre par la décision 2011/833/UE de la Commission du 12 décembre 2011 relative à la réutilisation des documents de la Commission (JO L 330 du 14.12.2011, p. 39). Sauf mention contraire, la réutilisation du présent document est autorisée dans le cadre de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Cela signifie que sa réutilisation est autorisée moyennant citation appropriée de la source et indication de toute modification. Pour toute utilisation ou reproduction de photos ou d'autres éléments qui ne sont pas la propriété de l'UE, l'autorisation doit être obtenue directement auprès des titulaires du droit d'auteur.

Tous les contenus © Union européenne, 2023, sauf mention contraire dans le document.

ISBN, livre imprimé: 978-92-68-11355-4 doi: 10.2889/586036

Numéro de catalogue : HV-09-23-074-FR-C

ISBN, livre électronique (PDF): 978-92-68-11356-1 doi: 10.2889/399616

Numéro de catalogue: HV-09-23-074-FR-N

Comment citer ce rapport: Commission européenne, «Plan européen de radionavigation 2023», 2023, ISBN 978-92-68-11355-4, doi: 10.2889/586036.

## Table des matières

|   |    |
|---|----|
| Table des matières.....   | 3  |
| 1 INTRODUCTION.....   | 6  |
| 1.1 Contexte du plan européen de radionavigation (ERNP).....  | 7  |
| 1.2 Objet de l'ERNP.....  | 8  |
| 1.3 Portée de l'ERNP.....   | 8  |
| 1.4 Objectifs de l'ERNP.....  | 8  |
| 1.5 Structure de l'ERNP.....  | 9  |
| 1.6 Commentaires concernant l'ERNP.....   | 9  |
| 2 PAYSAGE DU PNT.....   | 10 |
| 2.1 Introduction au PNT.....  | 11 |
| 2.2 Le rôle du PNT dans la société.....   | 12 |
| 2.3 Avantages économiques du PNT/des GNSS.....  | 13 |
| 2.4 Besoins des utilisateurs de PNT.....  | 14 |
| 2.5 Enjeux auxquels sont confrontés le PNT/les GNSS.....  | 16 |
| 2.6 Tendances et opportunités.....  | 18 |
| 2.7 Systèmes et services PNT.....   | 20 |
| 2.7.1 Vue d'ensemble des systèmes PNT.....  | 20 |
| 2.7.2 Systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS) et systèmes de renforcement.....         | 23 |
| 2.7.3 Systèmes PNT conventionnels.....  | 25 |
| 2.7.4 Systèmes PNT émergents/de nouvelle génération.....  | 27 |
| 2.8 Interopérabilité et compatibilité.....  | 29 |
| 2.9 Politiques internationales en matière de PNT.....   | 30 |
| 3 LE PNT DANS L'UE.....   | 31 |
| 3.1 Programme spatial de l'UE 2021-2027.....  | 32 |
| 3.2 Services de Galileo.....  | 33 |
| 3.2.1 Service ouvert (OS) Galileo.....  | 34 |
| 3.2.2 Service haute précision (HAS).....  | 37 |
| 3.2.3 Service d'authentification commercial (CAS)/Service d'authentification des signaux (SAS)..... | 38 |
| 3.2.4 Service public réglementé (PRS).....  | 39 |
| 3.2.5 Service d'urgence (ES).....   | 40 |
| 3.2.6 Service de datation (TS).....   | 41 |
| 3.2.7 Contribution au service de recherche et de sauvetage (SAR).....                               | 42 |
| 3.2.8 Contribution aux services de sauvegarde de la vie.....  | 43 |
| 3.2.9 Contribution aux informations météorologiques spatiales.....                                  | 44 |
| 3.2.10 Feuille de route pour les services de Galileo.....   | 45 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 3.3    | Services d’EGNOS.....  | 46  |
| 3.3.1  | Service ouvert (OS) EGNOS.....   | 47  |
| 3.3.2  | Service de sauvegarde de la vie (SoL) EGNOS .....  | 48  |
| 3.3.3  | Service d’accès aux données EGNOS (EDAS).....  | 51  |
| 3.4    | Politiques de l’UE en matière de PNT et mesures recommandées.....  | 52  |
| 3.4.1  | Résilience des infrastructures critiques européennes .....   | 53  |
| 3.4.2  | Pacte vert pour l’Europe.....  | 54  |
| 3.4.3  | Aviation avec équipage à bord .....  | 55  |
| 3.4.4  | Aviation sans équipage à bord .....  | 57  |
| 3.4.5  | Navigation maritime et intérieure.....   | 59  |
| 3.4.6  | Transport routier .....  | 62  |
| 3.4.7  | Transport ferroviaire .....  | 64  |
| 3.4.8  | Agriculture .....  | 65  |
| 3.4.9  | Services dépendant de la localisation .....  | 67  |
| 3.4.10 | Recherche et sauvetage .....   | 68  |
| 3.4.11 | Cartographie et arpentage .....  | 69  |
| 3.4.12 | Secteurs ayant besoin de services de datation et de synchronisation précis (finance, réseaux électriques, communication) ..... | 71  |
| 3.4.13 | Utilisateurs du secteur spatial .....  | 72  |
| 3.4.14 | Sécurité et défense.....   | 73  |
| 3.4.15 | Besoins des utilisateurs de transports multimodaux .....   | 74  |
| 3.4.16 | Transport de marchandises et logistique .....  | 74  |
| 3.5    | Coopération de l’UE en matière de navigation par satellite .....   | 75  |
| 4      | VISION DU PNT DANS L’UE.....   | 77  |
| 5      | APPENDICE A: Systèmes PNT .....  | 80  |
| 5.1    | Systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS).....  | 80  |
| 5.1.1  | Systèmes de navigation par satellite à couverture mondiale .....   | 83  |
| 5.1.2  | Systèmes de navigation par satellite à couverture régionale .....  | 99  |
| 5.1.3  | Systèmes de renforcement .....   | 104 |
| 5.2    | Systèmes PNT conventionnels .....  | 109 |
| 5.2.1  | NDB.....   | 109 |
| 5.2.2  | VOR.....   | 110 |
| 5.2.3  | DME .....  | 111 |
| 5.2.4  | ILS .....  | 112 |
| 5.2.5  | TACAN.....   | 114 |
| 5.2.6  | Loran.....   | 115 |
| 5.2.7  | Systèmes de distribution du temps et de fréquences à ondes longues .....   | 118 |



|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 5.2.8  | Horloges atomiques .....  | 119 |
| 5.3    | Technologies émergentes .....   | 121 |
| 5.3.1  | White Rabbit (WR).....  | 122 |
| 5.3.2  | Distribution horaire sur réseau informatique .....                              | 123 |
| 5.3.3  | Pseudolites .....   | 124 |
| 5.3.4  | PNT fondé sur les réseaux 5G et cellulaires .....                               | 126 |
| 5.3.5  | Ranging Mode (R-Mode) .....   | 128 |
| 5.3.6  | Navigation visuelle .....   | 130 |
| 5.3.7  | Navigation mobile .....   | 132 |
| 5.3.8  | Navigation à l'estime sur la base d'une unité de mesure inertielle .....        | 134 |
| 5.3.9  | Navigation magnétique .....   | 135 |
| 5.3.10 | Orbite terrestre basse (LEO).....   | 136 |
| 5.3.11 | Technologies quantiques.....  | 138 |
| 5.3.12 | PNT fondé sur des pulsars .....   | 142 |
| 5.4    | Résumé des forces, des faiblesses, des opportunités et des menaces (SWOT) ..... | 144 |
| 6      | APPENDICE B: Services PNT résilients.....                                       | 146 |
| 7      | APPENDICE C: Réglementations et normes .....                                    | 147 |
| 8      | APPENDICE D: Principales parties prenantes du PNT dans l'UE .....               | 152 |
| 9      | APPENDICE E: Repères de référence de l'UE .....                                 | 156 |
| 10     | APPENDICE F: ACRONYMES .....  | 158 |

# 1 INTRODUCTION

Les services dépendant des **technologies de positionnement, de navigation et de synchronisation (PNT<sup>1</sup>)** sont depuis longtemps un **moteur de croissance économique**. Ils jouent également un rôle essentiel dans la société et dans de multiples secteurs et soutiennent des infrastructures critiques. Tandis que la dépendance à l'égard des services PNT s'accroît dans les applications civiles et commerciales, ces services jouent aussi un rôle de plus en plus important dans les opérations de défense, de sécurité et de sauvegarde de la vie.

Aujourd'hui, les services PNT reposent principalement sur des systèmes de radionavigation et notamment sur les services fournis par les **systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS)**. L'utilisation des GNSS s'est répandue dans de nombreux secteurs, et ce grâce à l'extension des constellations existantes et à la création de nouvelles constellations. Aujourd'hui, environ **10 % du PIB de l'Union européenne (UE)** dépend de l'utilisation des **services GNSS** et, d'après ce que l'on observe, ce taux continuera d'augmenter. Dans l'ensemble, il existe un potentiel considérable pour l'industrie, dans de nombreux secteurs et entre eux, de mieux exploiter les services GNSS et de tirer parti — et profit — des performances supérieures offertes par les GNSS.

Les **systèmes PNT terrestres** jouent depuis de nombreuses années un rôle clé, que ce soit en combinaison avec les GNSS ou indépendamment de ceux-ci. Toutefois, grâce à l'adoption et à l'évolution des solutions GNSS, il est possible de désactiver ou de **rationaliser certains systèmes PNT terrestres**. Cela permettrait de réaliser des économies pour l'installation, l'exploitation et l'entretien des infrastructures terrestres. Cela libérerait également le spectre électromagnétique associé à ces systèmes.

Les signaux GNSS sont toutefois vulnérables aux interférences naturelles et artificielles et aux attaques intentionnelles telles que le brouillage et le leurrage. Dès lors, pour les applications critiques ou la protection des infrastructures critiques, il est largement admis que les informations PNT ne doivent pas provenir uniquement des GNSS, même dans un environnement multiconstellation et multifréquence. Pour ces applications, il y a lieu de développer et de maintenir une solution **PNT de substitution** (en tant que solution de repli mais aussi complémentaire), qui ne soit pas nécessairement fondée sur les technologies de radiofréquences.

Dans l'UE, c'est la Commission européenne (CE) qui gère les **systèmes mondiaux de navigation par satellite européens (GNSS européens)** Galileo et EGNOS. **Galileo** est un GNSS autonome de l'UE sous contrôle civil, qui fournit des services PNT de pointe aux utilisateurs du monde entier. **EGNOS, le système européen de navigation par recouvrement géostationnaire**, est le système de renforcement de l'UE qui améliore (du point de vue de la précision et de l'intégrité) les signaux de navigation générés par le système de positionnement mondial (GPS) aujourd'hui et par Galileo à l'avenir. EGNOS permet d'utiliser les signaux GNSS dans des applications de sauvegarde de la vie, notamment dans le secteur aéronautique.

**L'utilisation des services GNSS est multiple.** Pour ne citer que quelques exemples, ces services sont actuellement utilisés pour améliorer les flux de trafic et l'efficacité des véhicules, aider à suivre les colis et les envois en fournissant des solutions logistiques à valeur ajoutée, faciliter les opérations de protection civile dans les environnements difficiles, accélérer les opérations de sauvetage et fournir des outils indispensables aux garde-côtes et aux autorités de contrôle des frontières. Les services GNSS sont également précieux pour l'horodatage requis des opérations financières, pour la recherche scientifique dans des domaines tels que la météorologie, les sciences de l'atmosphère, la géophysique et la géodésie, ainsi que pour des activités économiques critiques.

Bien que le recours aux **GNSS** soit en augmentation, les services qu'ils proposent ne sont **pas encore exploités pleinement** dans tous les secteurs du marché. Par ailleurs, l'utilisation de véhicules autonomes, sans conducteur et télécommandés connaît une croissance exponentielle. Compte tenu du rôle que les services GNSS peuvent jouer dans tous ces secteurs du marché, il est manifeste que l'UE doit tirer pleinement parti des avantages que peuvent offrir Galileo et EGNOS et faciliter l'adoption de ces derniers secteur par secteur.

---

<sup>1</sup> Les acronymes sont définis à l'APPENDICE F.

## 1.1 Contexte du plan européen de radionavigation (ERNP)

Le contexte existant au moment de la rédaction de la présente version du plan européen de radionavigation (ERNP) — en 2023 — est un élément important pour l'ambition, la portée et les objectifs de cette version de l'ERNP. Les principaux aspects contextuels caractérisant cette édition de l'ERNP sont les suivants:

1. dans la [stratégie spatiale pour l'Europe](#), publiée en 2016, la Commission européenne était invitée à «élaborer[] un plan européen de radionavigation afin de faciliter l'introduction d'applications basées sur le système mondial de navigation par satellite dans les politiques sectorielles». Sur cette base, une [première version de l'ERNP](#) a été publiée en 2018.

Le document actuel, qui est la deuxième version de l'ERNP, a toujours pour objectif principal de «faciliter l'introduction des applications Galileo et EGNOS dans différents domaines commerciaux»;

2. en **2021**, la **Cour des comptes européenne** a publié un [rapport spécial](#) sur les programmes spatiaux Galileo et Copernicus de l'UE et sur la nécessité de déployer des efforts supplémentaires pour assurer l'adoption de leurs données et services.

Au point c) de la recommandation n° 4 («Mieux utiliser le cadre réglementaire pour soutenir l'adoption des services spatiaux de l'UE»), il est recommandé à la Commission européenne de «fixer un calendrier pour chaque segment de marché pertinent dans lequel la réglementation ou la normalisation sont susceptibles de faciliter l'utilisation de Galileo, puis [de] surveiller de près le respect de ces délais». L'objectif de la présente version de l'ERNP est donc de donner suite à cette recommandation;

3. les [services PNT, qui reposent essentiellement sur les GNSS, sont de plus en plus importants](#) pour l'économie et la société. Sont de plus en plus importants non seulement les services de [positionnement et de navigation](#), mais aussi les services de [synchronisation](#) (essentiels pour la finance, les réseaux électriques, la communication, etc.). Cette tendance s'intensifiera au cours des prochaines années.

Les données et les services spatiaux constituent un **catalyseur important pour la transformation numérique** de l'économie et de la société et sont à la base d'innovations numériques telles que les véhicules autonomes, les solutions intelligentes et les réseaux de télécommunications sans fil 5G et 6G;

4. les **perturbations des services GNSS sont de plus en plus fréquentes** en raison de la puissance relativement faible des signaux GNSS. Des appareils simples et peu onéreux peuvent provoquer des interférences délibérées dans les fréquences utilisées par les GNSS dans le but de perturber («brouiller») la réception des signaux GNSS, tandis que des brouilleurs d'une puissance beaucoup plus élevée peuvent toucher une zone beaucoup plus vaste. Citons aussi le [«leurrage»](#) des services GNSS, qui consiste à fournir de fausses informations pour induire en erreur la solution PNT. Enfin, les services GNSS peuvent subir une dégradation grave de leurs performances en raison de phénomènes météorologiques spatiaux ou de défaillances du système.

Dans le même temps, **les interférences affectant les GNSS sont de mieux en mieux connues et des mesures visant à améliorer la résilience des signaux GNSS sont proposées** (par exemple, la [coopération dans le domaine de la navigation par satellite entre l'Union européenne et les États-Unis, qui met l'accent sur la résilience des services](#)).

La présente version de l'ERNP examinera à la fois les efforts destinés à améliorer la résilience des services GNSS (c'est-à-dire les nouveaux services de Galileo, y compris l'authentification) et la manière dont d'autres technologies pourraient fournir des services PNT même en cas de perturbation des GNSS;

5. **les services PNT sont essentiels pour les applications émergentes et certaines technologies émergentes fourniront également des services PNT.**

Citons, afin d'illustrer le caractère essentiel des services PNT pour les applications émergentes, l'utilisation des **GNSS à des fins de positionnement** des [multiconstellations en orbite terrestre basse \(LEO\)](#) (ces services étant nécessaires pour contrôler la constellation) ou des [objets spatiaux](#) (ces services étant nécessaires pour le système de gestion du trafic spatial), ou leur utilisation **à des fins de synchronisation précise en dessous de la microseconde** des technologies [5G et 6G](#) partout dans le monde. Citons, comme exemples de

technologies émergentes délivrant des services PNT, les **constellations en LEO visant à fournir des services PNT** et les capacités futures des réseaux **5G et 6G ciblant la fourniture de services PNT précis**.

Cette version de l'ERNP examinera les technologies émergentes liées aux services PNT;

6. **autonomie stratégique en matière de PNT**: l'autonomie stratégique est un [objectif de l'Union européenne sous la Commission présidée par M<sup>me</sup> Ursula von der Leyen](#). L'UE œuvre au renforcement de l'autonomie stratégique européenne dans divers domaines, tels que l'[autonomie stratégique économique et financière de l'UE](#) ou la [boussole stratégique en matière de sécurité et de défense](#). La boussole stratégique appelle à adopter, d'ici à la fin de 2023, une **stratégie spatiale de l'UE pour la sécurité et la défense**;
7. citons enfin le [règlement \(UE\) 2021/696 relatif au programme spatial de l'UE](#), qui définit les services des systèmes de navigation par satellite européens, et les [priorités de la Commission européenne pour la période 2019-2024](#) auxquelles les services PNT et les GNSS en particulier apportent une contribution majeure (par exemple, le pacte vert pour l'Europe et une Europe adaptée à l'ère du numérique).

## 1.2 Objet de l'ERNP

Compte tenu des informations contextuelles susmentionnées, la présente édition de l'ERNP a pour objet:

1. de **fournir des informations pertinentes sur les systèmes et services PNT**, leur utilisation, leurs performances habituelles, leurs forces, leurs faiblesses, leur évolution, leurs tendances, leurs enjeux, leurs opportunités, etc.

Cette version de l'ERNP vise à fournir des informations synthétiques et résumées sur les systèmes et services PNT, en renvoyant, pour de plus amples informations, à des sources publiques;

2. de **faciliter l'adoption des services des GNSS européens (Galileo et EGNOS)**:
  - en fournissant des [informations détaillées sur les services actuels et futurs des GNSS européens](#) et sur leur valeur ajoutée par rapport aux autres services PNT/GNSS,
  - en recommandant, pour chaque secteur, des mesures à prendre au niveau de l'UE pour l'adoption des GNSS européens dans les différents domaines commerciaux (législation ou normes, par exemple);
3. de sensibiliser et de recommander des mesures pour **accroître la résilience des services PNT dans l'UE**.

## 1.3 Portée de l'ERNP

L'édition actualisée de l'ERNP couvre les aspects suivants:

1. les systèmes et services **PNT spatiaux et terrestres** les plus pertinents, y compris ceux qui ne sont pas fondés sur les radiofréquences;
2. les **utilisations actuelles et planifiées à l'avenir** des systèmes et services PNT;
3. les **systèmes et services PNT émergents** (LEO, 5G, fusion de capteurs, etc.) dans la mesure où ils sont destinés à jouer un rôle majeur en matière de PNT.

La version actualisée de l'ERNP n'entend pas décrire les systèmes et technologies qui ne sont pas utilisés principalement pour le positionnement, la navigation ou la synchronisation, comme les systèmes de surveillance (tels que les radars ou les caméras).

## 1.4 Objectifs de l'ERNP

Compte tenu du contexte, de l'objet et de la portée présentés dans les sections précédentes, les objectifs de la version actualisée de l'ERNP sont les suivants:

1. **présenter le PNT** et mettre en avant son **rôle important dans la société**, les **avantages économiques** qu'il génère et l'**incidence potentielle des perturbations du PNT**, le cas échéant, notamment sur les infrastructures critiques;



2. donner une vue d'ensemble des **besoins des utilisateurs de PNT** dans les différents secteurs du marché;
3. expliquer les **enjeux auxquels sont confrontés le PNT/les GNSS** ainsi que les **tendances et opportunités** pour les services PNT/GNSS;
4. donner une vue d'ensemble des **principaux systèmes et services PNT**, notamment les systèmes conventionnels, les systèmes fondés sur les GNSS et les systèmes émergents, en présentant leurs utilisations actuelles et futures ainsi que leurs performances habituelles, leur évolution, leurs forces et leurs faiblesses. Fournir des informations sur **l'interopérabilité et la compatibilité** des systèmes et services PNT;
5. donner une vue d'ensemble des **politiques internationales** pertinentes en matière de PNT;
6. fournir des **informations détaillées sur les services des GNSS européens** (Galileo et EGNOS) en soulignant leur valeur ajoutée par rapport aux autres services GNSS, y compris les services planifiés à l'avenir;
7. expliquer les **politiques de l'Union européenne** en matière de PNT, y compris les activités en cours visant à faciliter l'introduction des GNSS européens dans les politiques de l'UE;
8. recommander, par secteur de marché:
  - des **mesures visant à faciliter l'introduction des GNSS européens** (règlements et normes, notamment),
  - des **mesures visant à accroître la résilience des services PNT**;
9. fournir une **vision à moyen terme** de la manière dont le PNT devrait évoluer dans l'Union européenne.

## 1.5 Structure de l'ERNP

La version actualisée de l'ERNP sera structurée comme suit:

- la section 1 contient l'introduction et présente le contexte, l'objet, la portée, les objectifs et la structure du document;
- la section 2 examine le paysage du PNT, couvrant ainsi les objectifs 1 à 5, et contient une introduction au PNT, à son rôle dans la société, à ses avantages économiques, aux besoins des utilisateurs de PNT par segment de marché, aux enjeux, aux tendances et aux opportunités, en donnant une vue d'ensemble des principaux systèmes et services PNT, de leur interopérabilité et de leur compatibilité ainsi que des principales politiques internationales en matière de PNT;
- la section 3 traite du PNT dans l'UE, couvrant ainsi les objectifs 6 à 8, et présente le programme spatial de l'UE, les principaux services fournis par les GNSS européens Galileo et EGNOS et les politiques actuelles de l'UE en matière de PNT par segment de marché, ainsi que les mesures supplémentaires qui faciliteraient l'adoption des services de Galileo et d'EGNOS et/ou renforceraient la résilience des services PNT. Elle porte également sur les activités de coopération de l'UE liées aux GNSS;
- la section 4 présente la vision à moyen terme du PNT dans l'UE, couvrant ainsi l'objectif 9;
- les différents appendices fournissent des informations détaillées sur les différents aspects décrits dans le document.

## 1.6 Commentaires concernant l'ERNP

Les commentaires concernant l'ERNP sont les bienvenus et seront pris en considération lors de la prochaine mise à jour du document: <mailto:DEFIS-GNSS-ERNP@ec.europa.eu>.

## 2 PAYSAGE DU PNT

La présente section examine le paysage du PNT et couvre les objectifs 1 à 5 énoncés dans la section [1.4](#). Elle fournit au lecteur des informations succinctes utiles sur les systèmes et services PNT, les besoins des utilisateurs, les enjeux, les tendances et les opportunités, ainsi que sur les politiques internationales en matière de PNT. Elle jette les bases de la section suivante, qui examinera le PNT dans l'UE.

La présente section:

- contient une introduction au PNT (section [2.1](#));
- décrit le rôle du PNT/des GNSS dans la société (section [2.2](#));
- évalue les avantages économiques du PNT/des GNSS dans la société (section [2.3](#));
- résume les besoins des utilisateurs par segment de marché (section [2.4](#));
- décrit les enjeux auxquels sont confrontés le PNT/les GNSS (section [2.5](#));
- décrit les tendances et opportunités du PNT/des GNSS (section [2.6](#));
- résume les principaux systèmes et services PNT (section [2.7](#));
- explique l'importance de l'interopérabilité et de la compatibilité (section [2.8](#));
- résume les principales politiques internationales en matière de PNT (section [2.9](#)).

La présente section entend donner une vue d'ensemble des thèmes susmentionnés tout en renvoyant, pour de plus amples informations, à des sources publiques.

## 2.1 Introduction au PNT

On entend par «**PNT**» (positionnement, navigation et synchronisation) une combinaison de trois capacités distinctes mais faisant chacune partie intégrante de ce concept:

- le positionnement, qui est la capacité d'une personne ou d'un objet à déterminer son emplacement et son orientation en deux ou trois dimensions. Le positionnement se fait par référence à un système de coordonnées local ou, le plus souvent, mondial, tel que le repère de référence terrestre Galileo (GTRF), le repère de référence terrestre européen (ETRF) ou le repère international de référence terrestre (ITRF);
- la navigation, qui est la capacité de déterminer un trajet entre la position actuelle et la position souhaitée (relative ou absolue) et de naviguer sur ce trajet en corrigeant le cap, l'orientation et la vitesse;
- la synchronisation, qui est la capacité d'obtenir et de maintenir une datation au niveau local ou mondial (par exemple, temps universel coordonné ou UTC). Cela inclut également les services de transfert du temps.

La principale caractéristique du PNT moderne est la capacité **d'obtenir et de maintenir avec précision tant un positionnement qu'une synchronisation dans le repère de référence mondial** (GTRF, ETRF, ITRF, etc., pour le positionnement et UTC pour la synchronisation), partout dans le monde, sachant que différents systèmes PNT auront des portées géographiques différentes, allant de l'échelon local ou régional à l'échelon mondial.

Tout au long du présent document, les concepts clés suivants seront utilisés:

- **indicateurs de performance au niveau utilisateur**, généralement utilisés pour évaluer l'efficacité des services PNT:
  - disponibilité: pourcentage de temps pendant lequel la solution de positionnement, de navigation ou de synchronisation peut être calculée par l'utilisateur. Les valeurs varient considérablement en fonction de l'application et des services utilisés, mais elles sont généralement comprises entre 95 % et 99,9 %,
  - précision: différence entre la solution utilisateur réelle et la solution utilisateur calculée (pour le positionnement ou la synchronisation),
  - intégrité: mesure de la confiance qui peut être accordée à l'exactitude du positionnement ou de la synchronisation fourni par le récepteur,
  - continuité: capacité de fournir les performances requises au cours d'une opération sans interruption après le début de celle-ci;
- **autres indicateurs de performance pertinents** pour les récepteurs PNT:
  - délai d'obtention de la première position (TTFF): mesure de la performance d'un récepteur couvrant le délai entre l'activation et l'obtention d'une position dans les limites de précision requises,
  - résistance au leurrage et au brouillage intentionnel: paramètre qualitatif plutôt que quantitatif qui dépend du type d'attaque ou d'interférence que le récepteur est capable d'atténuer,
  - authentification: capacité du système à garantir aux utilisateurs qu'ils utilisent des signaux et/ou des données provenant d'une source fiable et, dès lors, à protéger les applications sensibles contre les menaces de leurrage.

## 2.2 Le rôle du PNT dans la société

Face à des défis mondiaux tels que la révolution numérique, le changement climatique et les pandémies, l'économie et la société ont besoin plus que jamais de solutions innovantes à même de traiter des mégadonnées, d'atténuer les catastrophes naturelles et d'origine humaine, de lutter contre les maladies et de renforcer la chaîne d'approvisionnement mondiale au service de notre vie quotidienne. **Le PNT et les GNSS jouent un rôle essentiel dans ces solutions innovantes**, et ce dans le cadre de milliers d'applications émergentes ou déjà utilisées par des citoyens, des pouvoirs publics, des organisations internationales, des ONG, des entreprises, des universités et des chercheurs dans le monde entier (Agence de l'Union européenne pour le programme spatial, [rapport de marché 2022 de l'EUSPA sur l'observation de la Terre et les GNSS](#)). Le parc total d'appareils GNSS en service passera de 6,5 milliards d'unités en 2021 à 10,6 milliards d'unités en 2031. Le segment des solutions pour les consommateurs représente la grande majorité du parc existant.

Outre ces évolutions répondant aux besoins du marché, la durabilité environnementale joue un rôle important. Le **pacte vert pour l'Europe** vise à construire une société résiliente face au changement climatique à une époque où certaines économies européennes sont encore largement tributaires du charbon et des combustibles fossiles. Cette initiative, qui englobe chaque aspect de la société et de l'économie et recouvre tous les domaines d'action, est considérée comme l'un des efforts législatifs les plus significatifs de l'histoire de l'Union européenne. L'objectif le plus connu du pacte vert pour l'Europe est sans doute celui qui consiste à ramener à zéro les émissions nettes de dioxyde de carbone d'ici à 2050, en les réduisant déjà de 55 % d'ici à 2030 (par rapport aux niveaux de 1990). Si l'Europe a déjà éliminé un quart de ses émissions depuis les années 1990, ce résultat n'est toujours pas suffisant pour atteindre les objectifs fixés pour 2030 et 2050. Les **données et services spatiaux de l'UE contribuent au pacte vert pour l'Europe** grâce au PNT qui est utilisé, par exemple, dans l'agriculture intelligente, ainsi que pour la réduction des émissions des transports routiers, maritimes et aériens au moyen de l'optimisation des itinéraires. En outre, l'UE finance et aide les entrepreneurs qui utilisent les données de Copernicus et de Galileo, ce qui se traduit principalement par le financement d'applications «vertes», tout en stimulant les marchés pertinents.

Un autre moteur important de notre société est la **transformation numérique**, planifiée par l'Europe à l'horizon 2030. L'**information géographique s'annonce comme un élément d'intégration**, ouvrant la voie à une infrastructure numérique commune, ouverte et innovante, plutôt que comme un simple facilitateur de positionnement ponctuel pour les applications. L'analyse des mégadonnées fondée sur l'intelligence artificielle (IA) promet de révolutionner l'utilisation des données satellitaires pour des tâches telles que la quantification de l'urbanisation mondiale, l'alimentation de la population mondiale et l'amélioration de la gestion des risques naturels ou des pandémies.

**L'augmentation du nombre de satellites et l'utilisation de plus de fréquences apporteront énormément d'avantages.** La bifréquence est déjà requise pour les algorithmes fondés sur la phase de la porteuse [positionnement cinématique en temps réel (RTK), positionnement ponctuel précis (PPP) et PPP-RTK] et la triple fréquence peut encore améliorer les performances des algorithmes de résolution des ambiguïtés de phase en ce qui concerne la séparation maximale par rapport à une station de référence (pour le RTK et le RTK en réseau), la fiabilité de la solution et le délai nécessaire pour obtenir et valider cette solution.

Toutefois, **les cyberattaques, y compris l'interférence par radiofréquence (RFI) des signaux GNSS**, constituent l'un des aspects les plus importants à prendre en considération. Les signalements d'incidents de brouillage intentionnel des signaux GNSS sont en augmentation, la majorité de ces incidents étant causés par des appareils dits de protection de la vie privée (illégaux dans la plupart des pays). Les incidents de leurrage des signaux GNSS augmentent également, mais moins rapidement. Les services GNSS devraient être en mesure de faire face à ces menaces en intégrant des **capacités d'authentification** et de contrôle en tant que composante nécessaire de la sécurité globale de l'application, sans préjudice d'autres techniques.

Enfin, il est essentiel d'envisager les services PNT via le prisme de la «**fusion de capteurs**» des systèmes, pour la conduite autonome et d'autres applications exigeantes. En effet, les évolutions futures devraient se faire au niveau de l'efficacité des techniques de fusion de capteurs. L'objectif n'est pas de disposer d'une seule technologie comme moyen de PNT «principal», mais d'associer toutes les technologies PNT qui existent.



## 2.3 Avantages économiques du PNT/des GNSS

Le PNT et les GNSS sont désormais des technologies omniprésentes pour des millions de personnes en Europe. Des signaux GNSS invisibles provenant de l'espace facilitent de nombreux aspects de notre vie quotidienne, qu'il s'agisse de vérifier le statut de notre train du matin avant d'aller travailler ou de regarder nos émissions de télévision préférées avant d'aller dormir.

L'analyse de l'EUSPA concernant les avantages socio-économiques des GNSS<sup>2</sup> estime les **avantages économiques des GNSS à un total de 2 000 milliards d'EUR** sur le territoire européen (défini comme l'EU-27 plus le Royaume-Uni, la Norvège et la Suisse) au cours de la période de référence (1999-2027). En outre, il a été estimé qu'au cours de la même période, plus de 100 000 emplois hautement qualifiés et hautement rémunérés dans les industries en aval et en amont pouvaient également être attribués aux GNSS en Europe.

Des rapports consacrés au [Royaume-Uni](#) et aux [États-Unis](#) estiment à la fois les avantages économiques générés par les GNSS dans l'économie concernée et les pertes économiques attendues en cas d'indisponibilité temporaire des GNSS. Pour les estimations des pertes, le scénario contrefactuel pertinent dans chaque application est celui de la technologie disponible pour un déploiement immédiat en cas d'indisponibilité, ce qui signifie que les estimations des pertes et des avantages varient considérablement. Les résultats des études portant sur le Royaume-Uni, les États-Unis et l'UE sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 — Résumé des avantages et pertes économiques déclarés

| Territoire couvert par l'étude | Avantages économiques (annuels) | Pertes économiques              | Pertes économiques (par jour) |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Royaume-Uni                    | 6,7 milliards de GBP            | 5,2 milliards de GBP (5 jours)  | 1,0 milliard de GBP           |
| États-Unis                     | 300 milliards d'USD             | 30,3 milliards d'USD (30 jours) | 1,0 milliard d'USD            |
| Europe                         | 69,0 milliards d'EUR            | non disponible                  | non disponible                |

Il ressort des divergences dans les valeurs déclarées qu'une **analyse minutieuse** des États européens serait nécessaire **avant qu'il ne soit possible d'étendre ou de généraliser les constatations au contexte européen**. Citons, parmi les différences importantes à prendre en considération, les différences géographiques, telles que la densité de population, les différences culturelles qui se traduisent dans les attitudes de la population et les cadres juridiques, les différences méthodologiques entre les études, telles que la portée de l'analyse (secteurs économiques considérés ou constellations de satellites incluses dans l'analyse) et le choix des scénarios contrefactuels, les différences d'ordre infrastructurel et leurs implications pour la résilience ou les technologies disponibles, et les différences d'horizons temporels, qui ont des conséquences pour les incidences totales estimées et les valeurs «quotidiennes» moyennes.

Il importe de signaler que le [rapport RAND](#) soutient que **le coût d'une indisponibilité des GNSS pourrait être surestimé**, éventuellement de manière considérable, étant donné que des solutions de repli sont déjà opérationnelles dans de nombreux secteurs.

En résumé, et en dépit des différences et des avis rapportés ci-dessus, nous pouvons affirmer que les GNSS fournissent **chaque année des centaines de milliards d'EUR à la richesse mondiale**, tandis qu'une indisponibilité des GNSS ne serait-ce que de quelques jours pourrait entraîner des **pertes économiques** de l'ordre de plusieurs **milliards d'EUR par jour** dans le monde.

<sup>2</sup> Afin d'évaluer les avantages économiques générés par les GNSS en Europe, cette étude a comparé la qualité des services rendus possibles par les GNSS à un scénario contrefactuel dans lequel la meilleure solution de substitution technologiquement réalisable aurait été mise au point à la place. Dans de nombreux cas, les solutions hypothétiques n'ont pas été mises au point à l'échelle requise, essentiellement en raison du faible coût, des performances élevées et de la grande disponibilité des GNSS.









## 2.4 Besoins des utilisateurs de PNT

Les besoins des utilisateurs des services PNT sont largement expliqués dans les [rapports de l'EUSPA sur les besoins et les exigences des utilisateurs](#). Ces rapports comprennent une vue d'ensemble du marché, présentent les tendances, analysent les exigences des utilisateurs et décrivent les spécifications en la matière pour différents segments du marché.

En outre, le [rapport de marché 2022 de l'EUSPA sur l'observation de la Terre et les GNSS](#) comporte une description détaillée de l'utilisation des services PNT/GNSS dans différents domaines commerciaux et donne une vue d'ensemble des principales applications.

D'autres documents de pays tiers, tels que le [rapport des États-Unis sur les avantages économiques du système GPS](#) et le [plan fédéral de radionavigation des États-Unis](#), fournissent des informations similaires.

L'[Illustration 1](#) donne une vue d'ensemble du rôle et de l'évolution des GNSS dans différents segments de marché.

|   |  |
|---|--|
|    | <b>Agriculture</b> – New technologies are pushing the Agriculture sector to new frontiers. GNSS is considered a key driver and enabler for these evolutions, ranging from traditional farming applications to Internet-of-Things, blockchain, Agri-fin tech and value chain management. GNSS-enabled livestock wearables are emerging as an exciting trend which is improving animal welfare.                    |
|   | <b>Aviation and Drones</b> – Global air traffic took a huge hit due to COVID-19 – airlines responded with consolidation of fleets, and older aircraft prioritised for retirement. Meanwhile, standards evolution in navigation and surveillance presses ahead, enhanced by growing demand from increasingly sophisticated drone operations.  |
|  | <b>Biodiversity, Ecosystems and Natural Capital</b> – In the domain of biodiversity, ecosystems and natural capital, GNSS-beacons are used to geo-locate animals for the purposes of monitoring migrations, habitats, and behaviours. These are becoming more accurate and additional biodiversity applications are emerging (e.g. botanical mapping).   |
|  | <b>Climate Services</b> – GNSS has limited but important application in the climate services domain. The technology supports a range of geodetic applications that measure properties of the earth (magnetic field, atmosphere) with direct impact on the Earth's climate. GNSS is expected to have an increasing role in the growing market of climate modelling.   |
|  | <b>Consumer Solutions, Tourism and Health</b> – GNSS finds increasing use in facilitating our daily lives. From context-aware apps monitoring peak visit times to contactless deliveries and personal fitness apps (powered by wearable devices), navigation and positioning information plays a vital role.   |
|  | <b>Emergency Management and Humanitarian Aid</b> – Estimated to save 2,000 lives a year, the new MEOSAR system of the GNSS-based COSPAS-SARSAT programme relies on the proper use of GNSS-enabled Search and Rescue beacons. On the field, GNSS is a valuable tool to coordinate emergency response and humanitarian aid.  |
|  | <b>Energy and Raw Materials</b> – Monitoring and management of electricity utility grids heavily rely on GNSS timing and synchronisation, allowing the balance supply and demand and ensuring safe operations. In the domain of raw materials, the increased uptake of augmented GNSS supports site selection, planning and monitoring, as well as mining surveillance activities and mining machinery guidance. |
|  | <b>Fisheries and Aquaculture</b> – GNSS plays a vital role for the efficient and effective monitoring of fisheries activities through applications such as VMS and AIS. As the focus on the sustainability of these activities grows, agriculture lands diminish and food demand rises, GNSS applications are themselves seeing higher demand.   |



**Forestry** – GNSS is becoming an extremely valuable tool in monitoring and maintaining the sustainability of our forests. Besides precision forestry management, a key emerging trend is the use of GNSS-enabled UAVs and tracking devices help ensure the health of our trees and the efficiency of our timber supply chains.



**Infrastructure** – GNSS contributes to the proper functioning of Infrastructures operations. It allows a safe and on-time completion of construction work through the provision of high accuracy services and supports the synchronisation of telecommunication networks. With the transition towards 5G, the GNSS Timing & Synchronisation function is expected to play an increasingly critical role in telecommunication network operations.



**Insurance and Finance** – The financial world relies on GNSS timing and synchronisation for the accurate timestamping of financial transactions. Insurers, on the other hand, are turning towards GNSS-enabled UAVs for a more accurate and faster claim assessment.



**Maritime and Inland Waterways** – GNSS has shown its versatility providing data insights to monitor global shipping and port activities during the pandemic. Looking to the future, with automation and 5G expected to bring technological advancements in ports, GNSS will continue expanding its role beyond merely providing navigation information.



**Rail** – GNSS is becoming one of the cornerstones for non-safety related applications (e.g. asset management), whilst future adoption of GNSS for safety-related applications, including Enhanced Command & Control Systems, is expected to increase railway network capacity, decrease operational costs and foster new train operations. Thanks to GNSS taking part in digitalisation, Rail is becoming safer, more efficient and more attractive.



**Road and Automotive** – Despite the global slowdown of car production and sales, regulation for safer and autonomous vehicles is on track, with GNSS doubtless playing a key role. With In Vehicle Systems remaining the dominant source of Positioning, Navigation and Timing, it is moreover clear that public transport is increasingly adopting GNSS to improve its services.



**Space** – From using real-time GNSS data for absolute and relative spacecraft navigation, to deriving Earth Observation measurements from it, GNSS has also proven its worth for in-space applications. Driven by the NewSpace paradigm, the diversification and proliferation of space users leads to an increasing need for spaceborne GNSS-based solutions.



**Urban Development and Cultural Heritage** – In this field, GNSS-based solutions are used, in conjunction with EO, to accurately survey and map urban areas and to build advanced 3D models of the built environment. With more than 56% of the population already living in urban areas and this number expected to increase, digital solutions powered by GNSS will be needed more than ever support sustainable growth.

Illustration 1 – Rôle et principales tendances des GNSS sur les marchés (source: [rapport de marché 2022 de l'EUSPA sur l'observation de la Terre et les GNSS](#))

## 2.5 Enjeux auxquels sont confrontés le PNT/les GNSS

Les **signaux GNSS**, qui sont reçus à un très faible niveau de puissance, sont **vulnérables** aux interférences par radiofréquence (RFI) et aux phénomènes naturels (scintillation ionosphérique, par exemple), lesquels peuvent entraîner une perturbation des services GNSS. Ces incidents peuvent être **délibérés** (attaques **de brouillage et de leurrage**), mais aussi **accidentels** (rayonnement parasite d'autres appareils radioélectriques, propagation multitrajets des GNSS).

Bien que les vulnérabilités des GNSS soient désormais communément reconnues, la **confiance** dans les systèmes ou applications PNT dépasse le cadre des GNSS et doit englober l'**application de bout en bout**, dont le niveau de sûreté ou de sécurité n'est que celui de sa composante la plus faible. Les GNSS ne sont pas nécessairement l'élément le plus facile à attaquer pour les acteurs malveillants: il pourrait être plus facile ou moins coûteux de pirater la sortie d'un récepteur pour envoyer de fausses positions que de leurrer les signaux GNSS entrants. C'est par exemple ainsi que le système d'identification automatique (AIS) maritime transmet des positions à des milliers de kilomètres de la position réelle du navire, ce qui est aujourd'hui hors de portée de toute tentative de leurrage.

En juillet 2022, l'Union internationale des télécommunications a publié la [lettre circulaire CR/488](#) relative à la prévention des brouillages préjudiciables causés aux récepteurs du service de radionavigation par satellite. La [résolution A41-8C de l'Assemblée de l'Organisation de l'aviation civile internationale \(OACI\)](#) encourage les États à prendre des mesures pour assurer la résilience des systèmes et des services de communications, navigation et surveillance/gestion du trafic aérien (CNS/ATM), invite l'OACI à obtenir des services de positionnement et de synchronisation plus résilients et encourage les organismes de normalisation et l'industrie à mettre au point des moyens appropriés de détection, d'atténuation et de notification du brouillage pour les composantes embarquées, satellitaires et sol des systèmes CNS.

La [directive 2014/53/UE relative aux équipements radioélectriques \(RED\)](#) établit les exigences essentielles auxquelles les appareils PNT doivent satisfaire pour être mis sur le marché de l'UE. La directive RED est l'acte juridique de l'UE qui oblige les fabricants d'équipements radioélectriques, y compris les émetteurs et récepteurs GNSS, à utiliser efficacement le spectre radioélectrique. En d'autres termes, les produits conformes à la directive RED évitent la production d'interférences préjudiciables, qui sont les éléments susceptibles d'affecter les services de radionavigation. L'utilisation, à l'appui de la mise en œuvre de la directive RED, de normes harmonisées élaborées par les [organisations européennes de normalisation](#) confère une présomption de conformité avec les prescriptions juridiques.

Outre les mesures établies dans les normes harmonisées qui reflètent l'état de développement des technologies, plusieurs mesures peuvent actuellement être prises pour [protéger contre le brouillage intentionnel et le leurrage des signaux GNSS](#):

- **garantir un environnement de radiofréquences propre** et l'utilisation des bandes de fréquences attribuées par l'Union internationale des télécommunications. Il s'agit là du tout premier niveau de protection pour les utilisateurs des GNSS;
- **authentifier les signaux GNSS**: l'authentification des signaux GNSS est possible par l'incorporation de caractéristiques spécifiques qui ne peuvent être prédites ou falsifiées par des acteurs malveillants dans les signaux de radiodiffusion. Un récepteur activé pour l'authentification peut interpréter ces caractéristiques afin de distinguer les signaux authentiques des imitations. Cette action peut couvrir deux niveaux complémentaires: le niveau des données, pour authentifier les messages de navigation radiodiffusés, et le niveau de la porteuse pour authentifier les distances mesurées par rapport aux satellites;
- **utiliser plusieurs sources d'informations de positionnement** afin de recouper la solution avec des relevés indépendants. Il est possible à cette fin d'utiliser des solutions multiconstellations et éventuellement multifréquences, ou encore de compléter la solution GNSS par d'autres technologies (par exemple, les smartphones contiennent généralement de nombreux capteurs qui peuvent être utilisés pour obtenir des informations de positionnement ou de mouvement redondantes);



- **utiliser une meilleure configuration d'antennes:** les antennes adaptatives (CRPA) peuvent être très efficaces contre le brouillage intentionnel, ou des configurations plus simples (à deux antennes) peuvent fournir des informations sur la direction de l'arrivée, ce qui est très utile pour détecter les signaux de leurrage entrants;
- **mettre en œuvre des techniques de récepteurs spécifiques,** fondées, par exemple, sur le contrôle de la puissance du signal ou du rapport porteuse/densité de bruit (C/N0), la comparaison des temps d'arrivée (TOA), les contrôles de distribution des sorties du corrélateur et les contrôles de cohérence entre différents indicateurs tels que les données des éphémérides, les changements de décalage d'horloge et l'effet Doppler du code/la fréquence Doppler de porteuse;
- **mettre en œuvre des techniques de contrôle de la qualité du signal (SQM):** le contrôle de la qualité du signal, conçu à l'origine pour la détection des trajets multiples et la surveillance de la déformation des formes d'onde, peut être utilisé pour détecter la déformation de la fonction de corrélation des attaques de leurrage les plus courantes. Le défi, pour la détection et le rejet des leurrages, consiste à opérer une distinction entre les signaux authentiques et les signaux indésirables. La détection des trajets multiples poursuit le même objectif et des techniques similaires sont donc proposées.

De nouvelles approches innovantes relatives au processus de corrélation, telles que le concept de «supercorrélateur», seraient à même de séparer les signaux en ligne directe des signaux des signaux indirects (NLOS) lors du processus de corrélation, permettant ainsi d'atténuer la propagation multivoie, de lutter contre les leurrages et de déterminer l'angle d'arrivée du signal. Aussi puissantes soient-elles, ces méthodes ne sont actuellement mises en œuvre que dans des récepteurs sophistiqués de haute qualité, mais **ne sont pas largement disponibles dans d'autres puces GNSS.**

Outre la faible puissance des signaux GNSS, il convient de signaler que les solutions GNSS sont le plus souvent indisponibles dans certains environnements, comme à l'intérieur des bâtiments, en sous-sol et dans les canyons urbains. Dans ces environnements, une combinaison de plusieurs technologies (par exemple, **hybridation des GNSS ou fusion de capteurs**) est utilisée pour assurer la continuité du PNT.

La **pénétration à l'intérieur des bâtiments** ainsi qu'une disponibilité élevée, une faible consommation d'énergie et un court délai d'obtention de la première position (TTFF) sont les principales exigences d'un marché très actif (marché grand public, internet des objets (IdO), solutions automobiles, drones ou robotique, par exemple).

De plus amples informations sont disponibles dans le [rapport de marché 2022 de l'EUSPA](#) et dans le [rapport technologique de l'EUSPA](#).

## 2.6 Tendances et opportunités

On peut observer les tendances ci-après pour les services PNT et GNSS.

### 1. Les solutions multiconstellations et multifréquences sont devenues la norme

Les quatre systèmes mondiaux (GPS pour les États-Unis, Galileo pour l'UE, GLONASS pour la Russie et BeiDou pour la Chine), les systèmes régionaux (QZSS pour le Japon et IRNSS pour l'Inde) et les différents systèmes de renforcement satellitaire (SBAS) — des États-Unis, de l'UE, etc. — comptent **plus de 100 satellites**, lesquels, grâce à une coordination internationale, se caractérisent par des signaux ouverts, des plans de fréquences compatibles, des systèmes communs d'accès multiple [le GLONASS ajoutant l'accès multiple par répartition en code (CDMA) à son ancien système d'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA)] et des systèmes de modulation (par exemple, la fréquence E1 de Galileo et la fréquence L1C du système GPS). Cela facilite la conception de puces et de récepteurs GNSS multiconstellations, au bénéfice des utilisateurs finaux.

En outre, toutes les constellations mondiales et régionales diffusent des **signaux ouverts dans des bandes de fréquences multiples communes** et les SBAS suivront cet exemple pour faire évoluer leurs services vers des services multifréquences et multiconstellations au cours des années à venir.

Outre les signaux ouverts interopérables de base, chaque constellation mondiale/régionale fournit des services spécifiques au moyen de signaux et de fréquences qui lui sont propres. C'est le cas des services publics tels que le service public réglementé (PRS) de Galileo ou le service de positionnement précis (PPS) du système GPS, ainsi que des services à valeur ajoutée [par exemple, le service haute précision (HAS) de Galileo, la fréquence L6 du QZSS ou le service de messagerie (SMS) de BeiDou].

Les **récepteurs bifréquences** présentent des avantages considérables par rapport aux récepteurs monofréquences sur le plan de la précision réalisable, mais aussi du point de vue de l'amélioration de la résistance aux interférences (en raison de la diversité des fréquences). Historiquement, pendant de nombreuses années, la bifréquence était limitée aux utilisateurs professionnels ou des pouvoirs publics, ainsi qu'à des récepteurs L1 + L2 onéreux. L'arrivée de quatre constellations GNSS complètes transmettant des signaux ouverts de haute qualité dans la bande de fréquences E5 a changé la donne et a entraîné une large disponibilité des puces bifréquences E1 + E5 pour le marché de masse.

### 2. Les récepteurs, les méthodes de traitement et les antennes évoluent en permanence pour offrir de meilleures performances

L'évolution de la conception des récepteurs est rendue possible par les **évolutions technologiques** dans l'**industrie des semi-conducteurs**, notamment par une **augmentation de la puissance de traitement**, permettant la prise en charge de davantage de canaux GNSS, et par la mise au point de **capteurs à faible coût** qui permettent un couplage plus étroit avec différentes technologies et fournissent des services de positionnement dans des lieux non couverts par les GNSS. Dans le même temps, les pressions du marché s'exercent en faveur d'une précision accrue, d'une amélioration des performances dans tous les environnements, d'un raccourcissement du délai d'obtention de la première position (TTFF) et d'un renforcement de la résilience au brouillage intentionnel et au leurrage.

Les erreurs GNSS sont généralement réduites par l'application de deux méthodes de modélisation: la représentation de l'espace par observation (OSR) fournit une correction complexe unique de la mesure de distance, telle qu'observée dans une station de référence proche (réelle ou virtuelle), tandis que, dans la méthode de la représentation de l'espace d'état (SSR), les différentes sources d'erreur sont estimées séparément par un réseau de stations de référence à fonctionnement continu (CORS) avant d'être envoyées au récepteur. Certains paramètres (tels que les retards dus à l'environnement pour le PPP) sont estimés à l'intérieur du récepteur plutôt que dans les réseaux de CORS. La méthode PPP-RTK associe des éléments des deux méthodes et fournit une précision modulable à tous les segments d'utilisateurs, du marché de masse à celui de la haute précision. L'**émergence d'applications de masse haute précision** montre un fort potentiel d'utilisation généralisée de la méthode PPP-RTK.

Les appareils géolocalisés de l'IdO nécessitent la disponibilité de relevés de position avec une consommation d'énergie très faible. C'est pourquoi des efforts ont été déployés ces dernières années pour **réduire**

**sensiblement la consommation d'énergie des GNSS**, ce qui a entraîné des progrès rapides dans la technologie des récepteurs (permettant une consommation inférieure à 10 mW en mode de suivi continu à 1 Hz) et l'utilisation de plusieurs techniques innovantes, notamment des solutions matures telles que les GNSS assistés (A-GNSS) ou les prévisions des éphémérides à long terme, ainsi que de nouvelles approches hybrides tirant parti de la connectivité inhérente à l'IdO.

**Les antennes sont un élément essentiel de la conception de tout récepteur.** Les meilleures puces et les techniques les plus sophistiquées en matière de traitement des signaux ne peuvent compenser les mauvaises performances d'une antenne. Bien que l'importance des antennes soit admise depuis longtemps dans les segments de la haute précision, d'autres segments, y compris le marché de masse, n'y adhèrent pleinement que maintenant. En effet, la disponibilité généralisée des récepteurs bifréquences ouvre de nouvelles perspectives, mais les antennes constituent une limitation aux performances globales.

### 3. Les technologies 5G et 6G permettent une connectivité omniprésente et peuvent contribuer au positionnement

La **technologie mobile** est historiquement passée d'une plateforme reliant les personnes (3G) à une connectivité reliant les personnes à l'information (4G). La technologie **5G** est la première technologie mobile conçue pour tout connecter. Elle devrait déboucher sur un écosystème d'internet des objets (IdO) massif et des applications de communication critiques permettant aux réseaux de répondre aux besoins de communication de milliards d'appareils connectés, selon un juste équilibre entre vitesse, latence et coût. La technologie **6G**, actuellement en développement, devrait permettre des applications allant au-delà des scénarios d'utilisation mobile actuels, telles que la réalité virtuelle et augmentée (VR/AR), les communications instantanées ubiquitaires, l'intelligence omniprésente et l'évolution de l'internet des objets (IdO).

À la différence des générations précédentes de réseaux radio, dans lesquelles le positionnement n'était qu'une fonction complémentaire, dans les réseaux radio mobiles **5G**, **le positionnement est considéré comme faisant partie intégrante du système** et jouera un rôle essentiel, rendant possible un large éventail de services et d'applications dépendant de la localisation. Une technologie essentielle du positionnement 5G est constituée par les signaux à large bande dans la gamme de fréquences 2 (FR2), qui comprend les fréquences opérationnelles attribuées à la 5G dans la zone mmWave (au-dessus de 24 GHz). Ces signaux à large bande (pouvant atteindre une bande passante de 500 MHz) permettent une meilleure résolution temporelle, mais aussi une formation de faisceau numérique précise, ce qui permet ainsi une estimation très précise du temps d'arrivée (TOA) et de la direction de l'arrivée (DOA), en particulier en conditions de visibilité directe. Une infrastructure 5G indépendante peut également servir de source de PNT de substitution, pour autant que cette infrastructure ne dépende pas des GNSS.

**L'association des GNSS européens et de la technologie 5G** sera vraisemblablement au cœur des futurs moteurs de localisation pour de nombreuses applications dans les domaines de l'IdO et des services dépendant de la localisation, entraînant une amélioration significative des performances en matière de localisation dans les villes. Grâce à ses connexions sans fil sûres, à ses vitesses de transmission de données plus rapides et à ses vastes capacités de données, la 5G peut fournir les éléments de base de la connectivité nécessaires pour permettre le **positionnement coopératif** ainsi que l'exploitation en toute sécurité des voitures sans conducteur, des drones, des robots mobiles et, plus généralement, du monde des objets autonomes.

À l'avenir, la **technologie 6G** vise à garantir un **positionnement de précision centimétrique** grâce à l'utilisation de surfaces réfléchissantes intelligentes, à de vastes réseaux d'antennes et à une formation de faisceau avancée et promet de supporter des applications telles que la livraison par drone, le suivi des actifs, la surveillance des soins de santé, l'agriculture de précision et les véhicules autonomes.

De plus amples informations sont disponibles dans le [rapport technologique de l'EUSPA sur les utilisateurs des GNSS](#).

## 2.7 Systèmes et services PNT

Historiquement, les **systèmes PNT conventionnels**, reposant sur des infrastructures terrestres/au sol, ont joué un rôle clé dans l'amélioration et le renforcement des services PNT, que ce soit en combinaison avec les GNSS ou indépendamment de ceux-ci. Il existe différents systèmes conventionnels et tous exploitent des principes de physique différents pour servir une fonction particulière, l'objectif principal étant de fournir une solution de positionnement et de synchronisation précise et fiable qui permette de naviguer d'un point géographique à un autre de manière sûre, de déterminer la position et d'en tirer des informations, telles que la vitesse et le cap, pour arriver à la destination souhaitée.

Aujourd'hui, les **systèmes et services PNT modernes dépendent des GNSS**, en raison de la capacité de ces derniers à maintenir un positionnement et une synchronisation à l'échelle mondiale avec des performances incomparables. La disponibilité des services GNSS évolue très rapidement et cette évolution rapide se poursuivra à court et à moyen terme. Ces dernières années, quatre GNSS (GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou) ont été déclarés opérationnels pour fournir des services PNT mondiaux sur la base de capacités multifréquences. En outre, des systèmes de renforcement au sol et spatiaux améliorent les performances des signaux GNSS pour des utilisateurs spécifiques, généralement au niveau régional ou local.

Cette panoplie de services GNSS interopérables permettra de **rationaliser** et même de **désactiver les systèmes PNT terrestres conventionnels**, ce qui entraînera une réduction des coûts d'entretien et d'exploitation et une rationalisation du spectre électromagnétique. Pour certaines applications critiques, notamment dans les secteurs de l'aviation, de l'électricité ou des banques ou pour les services d'urgence civils, une infrastructure de navigation de repli restera nécessaire pour que des capacités de guidage de base demeurent en place en cas de dysfonctionnement ou d'indisponibilité des GNSS.

Toutefois, et malgré leur succès sans pareil, les services GNSS présentent également certaines faiblesses, liées principalement à la faible puissance de leurs signaux, laquelle rend ces derniers vulnérables aux interférences. Il s'ensuit qu'il est nécessaire de mettre en place des systèmes et services **PNT de substitution** qui soient à même de fournir des capacités PNT indépendamment des GNSS (en principe avec des performances moins bonnes). En outre, les services PNT de substitution peuvent aussi compléter les services GNSS lorsque les signaux GNSS ne sont pas disponibles (par exemple, à l'intérieur des bâtiments ou en sous-sol), et ce grâce à une puissance de signal plus élevée. L'utilisation conjuguée des services GNSS et des services PNT de substitution peut garantir des **services PNT résilients**, à savoir des services PNT qui restent opérationnels même en cas de perte des services GNSS ou dans des environnements dans lesquels les solutions GNSS ne sont pas disponibles.

Les services PNT de substitution peuvent être fournis par des systèmes PNT conventionnels et/ou par des **systèmes PNT émergents/de nouvelle génération**, qui délivrent des services PNT dont les performances sont généralement inférieures à celles des services GNSS, dont la couverture est limitée ou dont le coût est plus élevé.

### 2.7.1 Vue d'ensemble des systèmes PNT

Tous les systèmes PNT ont pour objectif principal la fourniture d'**informations de positionnement et de synchronisation précises et fiables**, dans le but de permettre à l'appareil utilisateur d'obtenir sa localisation, de naviguer d'un point à un autre ou de se synchroniser avec une référence temporelle. L'aptitude des différents systèmes PNT à fournir des informations de positionnement, de navigation ou de synchronisation à une application donnée peut varier en fonction de leur technologie et de leur nature. L'[Illustration 2](#) donne une vue d'ensemble des différents systèmes PNT, en les classant comme des systèmes dépendant des **GNSS**, des systèmes **conventionnels** ou des systèmes fondés sur des technologies **émergentes**. Leur caractère adéquat est représenté par des couleurs donnant une idée de l'efficacité de chaque système, en fonction de plusieurs facteurs tels que ses performances ou la faisabilité de son déploiement. Si un système ne fournit pas une certaine fonctionnalité, cela est indiqué par la mention «sans objet». L'illustration permet de déterminer quels systèmes PNT pourraient être plus adaptés à un environnement donné ou à une application spécifique, en gardant à l'esprit qu'elle ne prend pas en considération pas d'autres critères tels que la portée géographique, la vulnérabilité à la météorologie spatiale ou les coûts. Ces systèmes PNT seront décrits dans les sections suivantes, et de plus amples informations à leur sujet sont disponibles à l'[APPENDICE A: Systèmes PNT](#).



|                           | SYSTÈMES  | Positionnement et navigation / Synchronisation |    | A l'extérieur / A l'intérieur et en sous-sol |    | Sauvegarde de la vie (aviation, navigation maritime) / Infrastructures critiques (énergie, télécommunication) |     | Niveau de maturité technologique   | REMARQUES  |
|---------------------------|---|--|----|--|----|---|-----|--|--|
|                           |   | Système PNT                                    |    | ENVIRONNEMENT                                |    | APPLICATIONS  | TRL |  |  |
| GNSS                      | Couverture mondiale                                     |  |    |  |    |   |     | 9  | Quatre constellations mondiales disponibles  |
|                           | Couverture régionale                                    |  |    |  |    |   |     | 9  | Deux constellations régionales disponibles au Japon et en Inde   |
|                           | Renforcement par satellite (SBAS)                       |  |    |  |    |   |     | 9  | De nombreux SBAS opérationnels ou en développement dans le monde entier<br>Aucune information sur l'intégrité de la synchronisation n'est fournie actuellement |
| SYSTEMES CONVENTIONNELS   | Aides à la nav. aérienne (VOR, DME, ILS, TACAN)         |  | -- |  |    |   | --  | 9  | Certaines feront partie du réseau minimal opérationnel (MON)   |
|                           | Loran-C   |  |    |  |    |   |     | 9  | Plus en service sauf en Chine et en Russie   |
|                           | eLoran et eLoran différentiel                           |  |    |  |    |   |     | 9  | Déjà désactivés dans l'UE et aux États-Unis  |
|                           | Distribution horaire à ondes longues                    | --   |    |  |    | --  |     | 9  | La précision du signal est limitée et des antennes spécifiques sont requises   |
|                           | Horloges atomiques                                      | --   |    |  |    | --  |     | 9  | Bonne précision de synchronisation pour les infrastructures critiques  |
| TECHNOLOGIES ÉMERGENTES   | White Rabbit  |  |    |  |    | --  |     | 9  | Nécessite une connexion à fibre optique ininterrompue  |
|                           | Distribution horaire sur réseau informatique            | --   |    |  |    | --  |     | 9  | Précision de la synchronisation à partir des réseaux ad hoc  |
|                           | Pseudolites   |  |    |  |    |   |     | 9  | Uniquement terrestres  |
|                           | Réseaux 5G et cellulaires                               |  |    |  |    |   |     | 7  | Technologies de communication qui peuvent également fournir des services PNT   |
|                           | R-Mode  |  |    |  |    |   | --  | 5  | Utilisation maritime, moyennant de légères modifications des infrastructures existantes  |
|                           | Navigation par images                                   |  | -- |  |    |   | --  | 6  | Technologies nombreuses, dépendantes du matériel   |
|                           | Navigation mobile                                       |  |    |  |    | --  | --  | 9  | Technologie fondée sur le système d'exploitation, nécessite une connexion internet   |
|                           | Navigation à l'estime et unités de mesure inertielle    |  | -- |  |    |   | --  | 9  | Système passif, enclin à la dérive sauf si couplé avec d'autres capteurs   |
|                           | Cartes environnementales                                |  | -- |  |    | --  | --  | 7  | Système passif, exige des informations cartographiées au préalable   |
|                           | Orbite terrestre basse (LEO)                            |  |    |  |    |   |     | 8  | Émergence de réseaux spatiaux à haut débit   |
|                           | Tech. quantiques (horloges/unités de mesure inertielle) |  |    |  |    |   |     | 4  | Nouvelle approche du matériel de navigation et de synchronisation  |
| PNT fondé sur des pulsars |   |  |    |  | -- |   | 3   | PN dans l'espace lointain, proposé comme nouvelle échelle de temps pour la Terre |  |

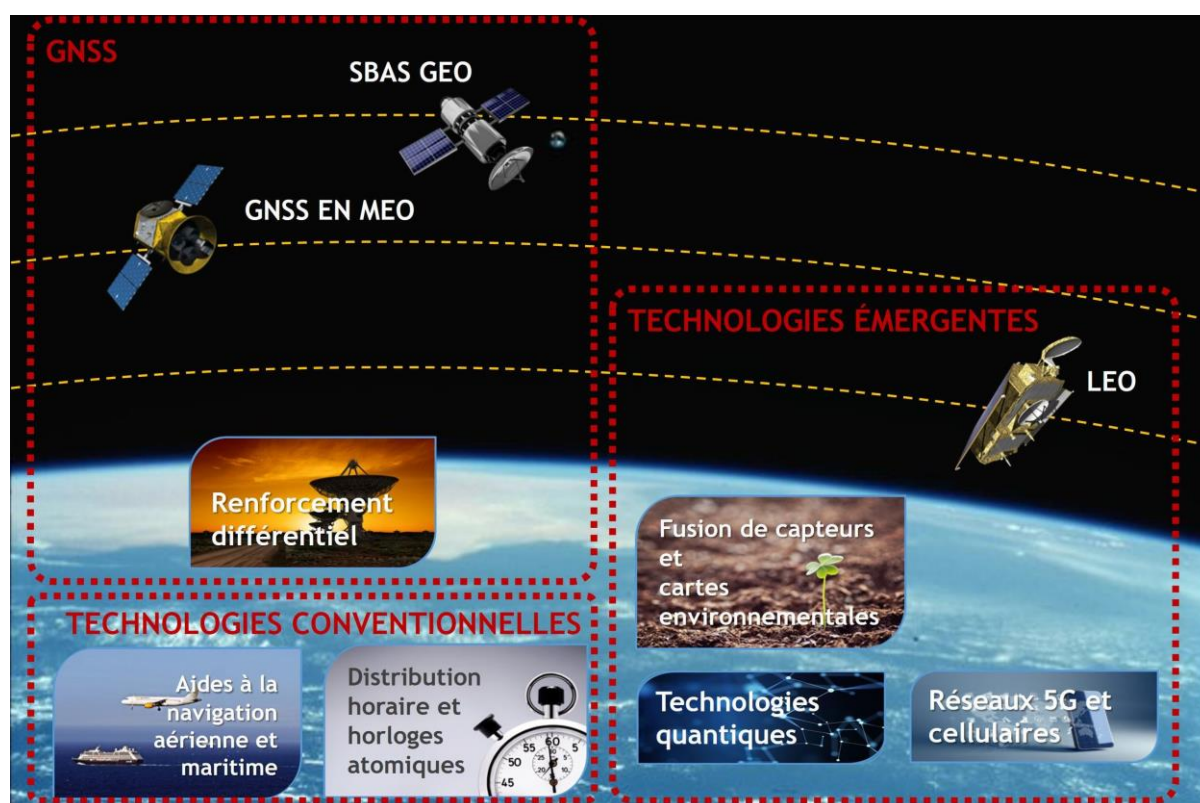
-- sans objet    Adéquation FAIBLE    Adéquation ÉLEVÉE  
 Adéquation MOYENNE    Potentiellement (en cours d'évaluation/de développement)

Remarque: le niveau de maturité technologique (TRL) est exprimé selon une échelle de couleurs allant du rouge pour le niveau LE PLUS BAS au vert pour le niveau LE PLUS HAUT.

Illustration 2 — Vue d'ensemble des systèmes PNT classés en systèmes dépendant des GNSS, systèmes conventionnels et systèmes fondés sur des technologies émergentes

L'[Illustration 3](#) donne une vue d'ensemble des systèmes PNT, en les classant en systèmes spatiaux ou terrestres:

- les systèmes **PNT spatiaux** comprennent les constellations de satellites en orbite terrestre moyenne (MEO) fournissant des services GNSS (section [5.1](#)), les satellites géostationnaires (GEO) renforçant les services GNSS (section [5.1.3.1](#)) ainsi que les mégaconstellations émergentes de satellites en orbite terrestre basse (LEO) (section [5.3.10](#));
- les systèmes **PNT terrestres** comprennent les systèmes PNT conventionnels tels que les aides à la navigation dans les secteurs aéronautique et maritime et les horloges atomiques (section [5.2](#)), les systèmes de renforcement des services GNSS tels que les systèmes différentiels ou de PPP (section [5.1.3.2](#)) ainsi que des technologies émergentes telles que la 5G ou la cartographie environnementale quantique (section [5.3](#)).



*Illustration 3 — Systèmes PNT classés en systèmes spatiaux et systèmes terrestres*

## 2.7.2 Systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS) et systèmes de renforcement

Un **système mondial de navigation par satellite (GNSS)** est une infrastructure PNT qui permet aux utilisateurs disposant d'un récepteur compatible de traiter les signaux des satellites et de déterminer la position, la vitesse et le temps (PVT). En fonction de la couverture de ces systèmes, il convient de distinguer:

- les systèmes de navigation par satellite à couverture mondiale: Galileo (UE), GPS (États-Unis), BeiDou (Chine), GLONASS (Russie), et
- les systèmes de navigation par satellite à couverture régionale: QZSS (Japon), IRNSS (Inde).

Les performances des GNSS peuvent être améliorées par des **systèmes de renforcement**, qui peuvent être classés comme suit:

- **systèmes spatiaux**: les corrections GNSS sont transmises aux utilisateurs via des satellites et les informations de renforcement sont fournies *à grande échelle* (c'est-à-dire à une échelle continentale).

Citons comme exemples de systèmes spatiaux les systèmes de renforcement satellitaire (SBAS), qui fournissent des services au secteur aéronautique. Les SBAS suivants existent aujourd'hui: EGNOS (UE), WAAS (États-Unis), MSAS (Japon), GAGAN (Inde), KASS (Corée du Sud), ANGA (Afrique centrale), SouthPAN (Australie et Nouvelle-Zélande), BDSBAS (Chine) et SDCM (Russie).

Citons également les systèmes de positionnement ponctuel précis (PPP), qui permettent un positionnement de précision centimétrique en temps réel en diffusant les corrections GNSS pour un modèle d'erreurs dues aux satellites des GNSS. Un PPP nécessite généralement des dizaines de minutes pour qu'une position finale précise soit donnée;

- **systèmes terrestres**: les corrections GNSS sont transmises aux utilisateurs par voie terrestre (via des stations terrestres ou l'internet). Les informations de renforcement sont généralement fournies *à une échelle locale* (c'est-à-dire des dizaines de kilomètres), mais il arrive aussi qu'elles soient fournies à grande échelle via l'internet (dans le cas du PPP).

Citons comme exemples de systèmes *locaux*:

- les systèmes de renforcement au sol (GBAS), qui fournissent des services au secteur aéronautique et lui donnent des informations de renforcement, y compris en matière d'intégrité (voir section [2.1](#)),
- les GNSS différentiels (DGNSS), qui fournissent des informations de renforcement visant à améliorer la précision de la position de l'utilisateur grâce au traitement des mesures de code des GNSS,
- le positionnement cinématique en temps réel (RTK), qui permet un positionnement de précision centimétrique en temps réel en quelques secondes grâce au traitement des mesures de phase des GNSS.

Enfin, cherchant à associer le meilleur des mondes RTK et PPP, des systèmes PPP-RTK ont fait leur apparition ces dernières années, alliant les délais d'initialisation rapides du RTK à la vaste portée du PPP;

- **systèmes fondés sur les récepteurs**: le récepteur utilisateur incorpore des informations de renforcement provenant de capteurs de navigation. Citons notamment les systèmes de renforcement fondés sur les avions (ABAS), le plus répandu étant le contrôle autonome de l'intégrité par le récepteur (RAIM).

De plus amples informations sur les différents GNSS et leurs systèmes de renforcement sont disponibles à l'[APPENDICE A: Systèmes PNT](#), tandis que les services de Galileo et d'EGNOS seront examinés en détail, respectivement, dans la section [3.2](#) et dans la section [3.3](#).

Les illustrations ci-dessous donnent une vue d'ensemble des GNSS et SBAS actuels, en présentant certaines de leurs caractéristiques principales et leur calendrier.

|  |                      |  | 2020                      | 2021   | 2022                               | 2023  | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 |  |
|--|----------------------|--|---------------------------|--|------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|--|
| SYSTÈMES DE NAVIGATION PAR SATELLITE         | COUVERTURE MONDIALE  | Galileo                                  | E1<br>E5<br>E6            | FOC — 24 VS + satellites de réserve  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | GPS                                      | L1                        | FOC — quelque 30 VS  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      |  | L1C                       | FOC — quelque 30 VS  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      |  | L2                        | FOC — 24 VS  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      |  | L2C<br>L5                 | FOC — 24 VS  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  | BeiDou               | B1<br>B2<br>B3                           | FOC — 44 VS               |  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  | GLONASS              | L1 FDMA                                  | FOC — 22 VS               |  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | L1 CDMA                                  | FOC — 22 VS               |  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | L2 FDMA<br>L2 CDMA<br>L3 CDMA<br>L5 CDMA | FOC — 24 VS               |  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  | COUVERTURE RÉGIONALE | QZSS                                     | L1C/A<br>L1C<br>L2C<br>L5 | 4 VS   |                                    |   |      |      |      |      | 7 VS |      |      |  |
| IRNSS  |                      | L1                                       | FOC — 7 VS                |  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | L5<br>Bande S                            | FOC — 7 VS                |  |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
| SYSTÈMES DE RENFORCEMENT SATELLITAIRE (SBAS) | COUVERTURE RÉGIONALE | EGNOS                                    | L1<br>L5                  | 2 satellites GEO (navigation en route, approches terminales, NPA, APV-I, CAT I)            |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | WAAS                                     | L1<br>L5                  | 2 satellites GEO (navigation en route, approches terminales, NPA, APV-I, CAT I)            |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | MSAS                                     | L1<br>L5                  | 1 satellite  | 1 satellite géostationnaire — QZS3 | 2 satellites GEO — QZS (navigation en route, approches terminales, NPA, APV-I, CAT I) |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | GAGAN                                    | L1<br>L5                  | 2 satellites GEO — GSAT8 et GSAT10 (navigation en route, approches terminales, NPA, APV-I) |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | KASS                                     | L1<br>L5                  | 2 satellites GEO (navigation en route, approches terminales, NPA, APV-I)                   |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | ANGA                                     | L1<br>L5                  | 2 satellites GEO (navigation en route, approches terminales, NPA, APV-I, CAT I)            |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | SouthPAN                                 | L1<br>L5                  | 2 satellites GEO (navigation en route, approches terminales, NPA, APV-I)                   |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | BDSBAS                                   | B1C<br>B2a                | 2 satellites GEO (navigation en route, approches terminales, NPA, APV-I, CAT I)            |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      | SDCM                                     | L1                        | sans objet   |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |
|  |                      |  | L5                        | sans objet   |                                    |   |      |      |      |      |      |      |      |  |

- Système PAS en service
- Système en cours de développement/de déploiement
- Système en capacité opérationnelle complète (FOC), avec indication du nombre de satellites (VS = véhicules spatiaux) opérationnels et des phases de vol

Illustration 4 — Vue d'ensemble des GNSS

## 2.7.3 Systèmes PNT conventionnels

Les systèmes PNT conventionnels, qui sont opérationnels depuis de nombreuses années, se composent principalement d'infrastructures au sol, telles que des antennes, des installations de soutien, des sites de surveillance et des centres de contrôle. Ils présentent les caractéristiques suivantes:

- **bandes de fréquences et puissance spécifiques**, qui confèrent au service ses caractéristiques essentielles, y compris la portée du système;
- En général, **un seul type de service** est fourni, comme la fourniture d'un relèvement, d'une distance ou d'une combinaison de ces deux éléments;
- **identification unique et normalisée sur un site spécifique**, afin de faciliter leur utilisation par des systèmes automatisés traitant leurs signaux;
- **conception fondée sur des normes bien connues et publiques**, qui spécifient les exigences applicables au système et permettent de vérifier et de valider correctement celui-ci.

En raison de l'utilisation accrue des GNSS, de l'obsolescence de certains de ces systèmes conventionnels et du coût de leur entretien, on observe une tendance à la **rationalisation**, avec malgré tout la conservation d'un réseau minimal à même de prendre en charge les opérations en l'absence de GNSS.

Par **exemple**, l'illustration ci-dessous, tirée du [plan directeur ATM](#) européen, montre l'évolution prévue des systèmes de navigation conventionnels (NDB, VOR, DME, ILS) dans le **secteur européen de l'aviation civile**. Plusieurs systèmes devraient être rationalisés ou désactivés au cours de la prochaine décennie, et ce en raison du déploiement et de la propagation fructueux des GNSS et de leurs systèmes de renforcement satellitaire et au sol. Cette rationalisation des infrastructures a notamment pour avantage de **réduire les coûts** d'exploitation et de **libérer les bandes de fréquences** occupées par les systèmes conventionnels. Néanmoins, afin que la gestion en toute sécurité du trafic aérien européen soit assurée en cas d'indisponibilité potentielle des GNSS, un **réseau minimal opérationnel (MON)** de systèmes conventionnels sera maintenu.

Il importe de souligner que les évolutions planifiées dans le plan directeur ATM sont celles qui sont envisagées par l'Union européenne (et qui reflètent également les plans d'évolution convenus au niveau de l'OACI). Toutefois, les systèmes PNT conventionnels relèvent en dernier ressort de la responsabilité des différentes autorités nationales, lesquelles peuvent suivre des politiques et des plans spécifiques qui diffèrent de ce qui est prévu dans le plan directeur ATM.

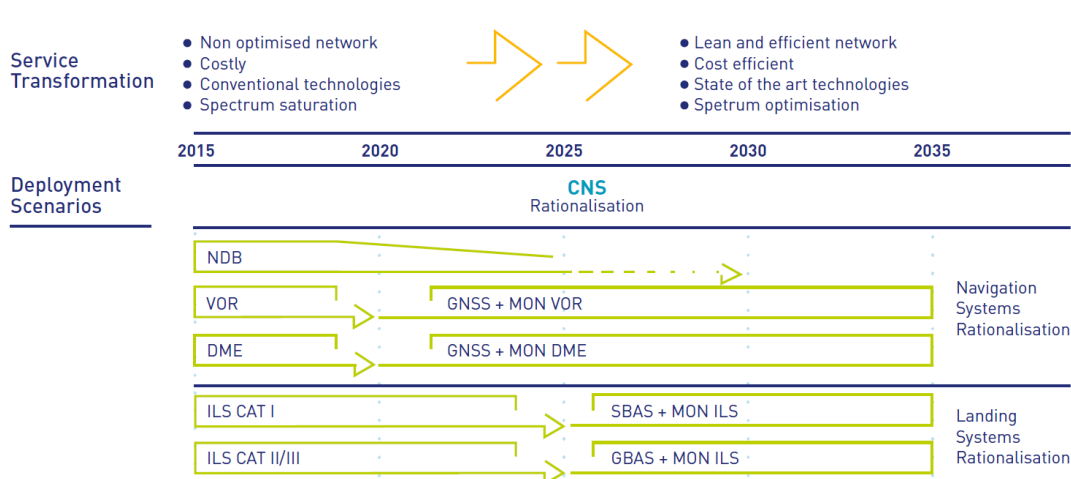


Illustration 5 — Rationalisation des aides à la navigation conventionnelles (source: [plan directeur ATM](#))

Enfin, l'[illustration 6](#) donne une vue d'ensemble des systèmes PNT conventionnels, de plus amples informations étant disponibles à l'appendice A, section [5.2](#).



| Système            | Bande de fréquences      | Type de PNT                         |                 | Précision   | Portée  | Spécification de nav. prise en charge (aviation) |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------|---|---|--|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                    |                          | Pos./Nav.                           | Synchronisation |   |   |  | 2020   | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 |
| NDB                | De 190 kHz à 1 750 kHz   | Relèvement par rapport à la NDB     | --              | Dépend de l'ADF à bord. La précision minimale de l'OACI pour les NDB est de ± 5°      | De 25 NM à 150 NM   | --   | Proposition de désactivation dans le plan directeur ATM européen |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| VOR                | De 108 MHz à 117,975 MHz | Relèvement par rapport au VOR       | --              | ± 2°  | De 25 NM à 130 NM   | RNAV 5   | Rationalisation vers un MON                                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| DME                | De 960 MHz à 1 215 MHz   | Distance par rapport au DME         | --              | ± 200 m (± 0,1 NM)  | Avec VOR: de 25 NM à 130 NM<br>Avec ILS: ± 15 NM  | RNAV 5, RNAV 2, RNAV 1, RNP 1 et A-RNP           | Rationalisation vers un MON                                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| ILS                | De 108 MHz à 111,975 MHz | Guidage H/V — Approche de précision | --              | CAT I: ± 10,5 m (35 pieds)<br>CAT II: ± 4,5 m (25 pieds)<br>CAT III: ± 3 m (15 pieds) | ± 15 NM   | --   | Rationalisation vers un MON                                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| TACAN              | De 960 MHz à 1 215 MHz   | Relèvement et distance              | --              | ± 1°<br>Composante DME ± 926 m (0,5 NM)   | ± 200 NM  | --   | Opérationnel depuis 1960   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Loran-C            | De 90 kHz à 110 kHz      |                                     |                 | < 460 m   | Longue portée<br>De jour: jusqu'à 600 NM<br>De nuit: jusqu'à 1 300 NM                         | --   | Non utilisé en Europe depuis 2015                                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| eLoran et dLoran   | De 90 kHz à 110 kHz      |                                     |                 | ± 20 m, ± 5 m pour dLoran   | 600 NM de jour (de nuit: jusqu'à 1 300 NM), dLoran 30 NM (grâce aux stations différentielles) | --   | Non utilisé en Europe depuis 2015                                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| DCF77              | 77,5 kHz                 | --                                  |                 | Écart à long terme (1 an) entre ± 5 ms et ± 150 ms                                    | ± 1 000 NM  | --   | Opérationnel depuis 1959   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Horloges atomiques | --                       | --                                  |                 | Sous la nanoseconde   | Pas de limite   | --   | Opérationnel depuis 1960   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

|    |                    |  |  |
|----|--------------------|--|--|
| -- | sans objet         |  | Système PAS en service   |
|    | Adéquation FAIBLE  |  | Réseau minimal opérationnel (MON) conformément au règlement d'exécution 2018/1048 sur la PBN |
|    | Adéquation MOYENNE |  | Système EN service (capacité opérationnelle complète — FOC)                                  |
|    | Adéquation ÉLEVÉE  |  |  |

Illustration 6 — Vue d'ensemble des systèmes PNT conventionnels

## 2.7.4 Systèmes PNT émergents/de nouvelle génération

Outre les systèmes PNT et services GNSS conventionnels, il existe une panoplie de **systèmes PNT émergents ou de nouvelle génération**, qui délivrent aujourd’hui des services dont les performances sont généralement inférieures à celles des services GNSS, dont la couverture est limitée ou dont le coût est plus élevé.

L’[Illustration 7](#) donne une vue d’ensemble des technologies PNT émergentes ayant la plus grande maturité et perçues comme étant les plus importantes. Ces technologies, regroupées principalement sur la base de leur similitude perçue au niveau matériel, comprennent:

- les technologies terrestres fournissant des services de synchronisation matures et hautement performants;
- les technologies radioélectriques, qu’elles soient terrestres (pseudolites ou Ranging Mode, par exemple) ou spatiales (satellites en LEO);
- la navigation mobile, qui est dans une certaine mesure agnostique sur le plan matériel et dépend fortement de la fusion de capteurs, de l’apprentissage automatique et de serveurs dorsaux; il s’agit d’une technologie de premier plan pour le marché de masse;
- les technologies non radioélectriques, telles que les systèmes inertiels et les capteurs magnétiques;
- les technologies visuelles, lidar ou radar, qui, bien qu’elles ne fournissent pas strictement de PNT, jouent un rôle important dans la fusion de capteurs;
- les technologies quantiques ou fondées sur des pulsars, qui, bien qu’elles ne soient pas encore arrivées à maturité, pourraient offrir des performances très intéressantes à l’avenir.

Une caractéristique importante de ces systèmes est leur maturité technologique, représentée par leur niveau de maturité technologique (TRL) dans la dernière colonne de l’illustration ci-dessus. L’échelle des TRL attribue un niveau allant de «1» (principes de base observés — degré de maturité le plus faible) à «9» (système réel prouvé dans un environnement opérationnel — degré de maturité le plus élevé). Plus le TRL est élevé, plus le système est prêt à être utilisé au niveau opérationnel.

Ces **technologies émergentes** se distinguent des aides conventionnelles et, dans une certaine mesure, des GNSS. En effet:

- elles sont conçues dans le cadre d’une offre combinée ou d’une approche de fusion de capteurs;
- en plus de fournir une position, elles créent une distribution horaire efficace, même si certaines peuvent avoir besoin d’une connexion à l’UTC;
- elles s’appuient sur des pratiques modernes en matière de développement de matériel et de logiciels, ce qui entraîne un développement rapide et des mises à jour par voie aérienne. Cela signifie également que toutes les unités sont connectées et n’ont généralement pas besoin d’une intervention manuelle après l’installation;
- elles disposent de capacités autonomes de surveillance, de détection et de signalement des défauts;
- elles affichent des améliorations en matière de cybersécurité, d’intégration avec d’autres systèmes, d’expérience des utilisateurs et de flexibilité.

De plus amples informations sur ces systèmes sont disponibles à l’appendice A, section [5.3](#).

| Système   | Bande de fréquences  | Type de PNT |                 | Précision   | Portée   | Niveau de maturité technologique (TRL) |
|---|--|-------------|-----------------|---|--|--|
|   |  | Pos./Nav.   | Synchronisation |   |  |  |
| White Rabbit (WR)                                       | --   |             |                 | Sous la nanoseconde/en centimètres  | Réseau, avec des répéteurs jusqu'à des centaines de kilomètres | 9                                      |
| Distribution horaire sur réseau informatique            | --   | --          |                 | Sous la microseconde  | Réseau, avec des répéteurs jusqu'à des centaines de kilomètres | 9                                      |
| Pseudolites   | Diverses bandes (par exemple WiFi, de 921,88 à 927,00 MHz) |             |                 | De 0,2 à 15 ns<br>De 0,005 m (porteuse) à 15 m (code)   | De 5 à 15 km   | 9                                      |
| Réseaux 5G et cellulaires                               | De 450 MHz à 6 GHz et de 24,25 GHz à 52,6 GHz              | 2D          |                 | Décamètres<br>Sous la microseconde  | Dépend de l'infrastructure du réseau                           | 7                                      |
| Ranging Mode (R-Mode)                                   | VHF et MF  | 2D          |                 | Décamètres  | 250 km   | 5                                      |
| Navigation par images                                   | --   |             | --              | Généralement de niveau décimétrique, la précision absolue varie                                   | Dépend du système  | 6                                      |
| Navigation mobile                                       | Bluetooth et WiFi  |             |                 | Quelques mètres (la précision de la hauteur permet de détecter le sol)                            | Généralement de plusieurs décimètres en Bluetooth et WiFi      | 9                                      |
| Navigation à l'estime et unités de mesure inertielle    | --   |             | --              | Dérive d'1 m après 2 min (haute qualité)<br>Dérive d'1 m après quelques secondes (faible qualité) | Pas de limite  | 9                                      |
| Cartes environnementales                                | --   | 2D          | --              | À l'extérieur: d'1 m à des centaines de mètres, à l'intérieur: < 1 m                              | Dépend du système  | 7                                      |
| Orbite terrestre basse (LEO)                            | Bandes K et L  |             |                 | 10 ns<br>10 m si statique   | Mondiale   | 8                                      |
| Tech. quantiques (horloges/unités de mesure inertielle) | --   |             |                 | Au moins un ordre de grandeur par rapport aux unités de mesure inertielle conventionnelles        | Pas de limite  | 4                                      |
| PNT fondé sur des pulsars                               | Rayons X (autres fréquences peu efficaces)                 |             |                 | 1 000 km  | Toute la galaxie   | 3                                      |

Remarque: le niveau de maturité technologique (TRL) est exprimé selon une échelle de couleurs allant du rouge pour le niveau LE PLUS BAS au vert pour le niveau LE PLUS HAUT.

-- sans objet      Adéquation MOYENNE      Adéquation ÉLEVÉE (2D = 2 dimensions)  
Potentiellement (en cours d'évaluation/de développement)

Illustration 7 – Vue d'ensemble des systèmes PNT émergents/de nouvelle génération

## 2.8 Interopérabilité et compatibilité

Face à l'émergence et à la modernisation des GNSS (y compris leurs composantes régionales et leurs systèmes de renforcement), il est nécessaire d'examiner **l'interopérabilité et la compatibilité des GNSS** entre les différents fournisseurs de services.

Le [comité international sur les systèmes mondiaux de navigation par satellite \(ICG\)](#) définit **l'interopérabilité** comme «la capacité des systèmes de navigation par satellite mondiaux et régionaux et de leurs systèmes de renforcement, ainsi que des services qu'ils fournissent, à être utilisés ensemble pour garantir au niveau de l'utilisateur de meilleures capacités que ce qui serait possible sur la seule base des signaux ouverts d'un seul système».

Dans le contexte des GNSS, l'interopérabilité devrait s'entendre comme la capacité des équipements utilisateurs à exploiter les signaux de navigation disponibles de différents GNSS et à produire une solution combinée qui présente généralement des avantages en matière de performances (par exemple, une meilleure précision, une plus grande disponibilité) par rapport à la solution d'un système autonome. L'interopérabilité est souvent examinée à deux niveaux différents: au niveau des **systèmes** et au niveau des **signaux**, tandis que l'interopérabilité au niveau des récepteurs est garantie par des normes internationalement reconnues. De plus amples informations sont disponibles sur la page [Interopérabilité de Navipedia](#).

D'après l'ICG, la **compatibilité** désigne «la capacité des systèmes de navigation par satellite mondiaux et régionaux et de leurs systèmes de renforcement à être utilisés séparément ou ensemble sans causer d'interférences inacceptables et/ou d'autres préjudices à un système et/ou service donné».

Deux aspects sont souvent pris en considération lors de l'appréciation de la compatibilité:

- la [compatibilité des radiofréquences \(RFC\)](#), y compris les facteurs liés aux propriétés en matière de corrélation croisée et au plancher de bruit permmissible des récepteurs;
- la [séparation spectrale entre les signaux autorisés et les autres signaux](#) et, si un chevauchement est inévitable, une coopération étroite entre les fournisseurs afin de garantir le service requis.

De plus amples informations sont disponibles sur la page [Compatibilité de Navipedia](#).

La coopération internationale est fondamentale pour garantir l'interopérabilité et la compatibilité des signaux GNSS (par exemple, structures de signaux, messages, fréquences porteuses, codes et modulations) et est menée dès le début du développement, tandis que les normes applicables aux récepteurs sont essentielles pour garantir l'interopérabilité et la compatibilité au niveau des récepteurs.

Tout comme dans le cas des GNSS, l'interopérabilité, la compatibilité et l'élaboration de normes sont nécessaires pour d'autres services PNT (ainsi, des normes sont en cours d'élaboration par l'IEEE pour des [équipements utilisateurs PNT résilients](#)).

## 2.9 Politiques internationales en matière de PNT

Reconnaissant l'importance des services PNT, les grandes économies mondiales ont adopté des politiques nationales en matière de PNT qui sont pertinentes au niveau international. La présente section donne une vue d'ensemble de ces politiques en matière de PNT.

Le [plan fédéral de radionavigation des États-Unis](#) (FRP) est la source officielle de la politique de PNT et de planification du gouvernement fédéral du pays. Ce plan comprend des chapitres concernant les rôles et responsabilités, la politique, les exigences d'utilisateurs de PNT représentatifs, les plans opérationnels et l'architecture PNT nationale, ainsi que des appendices portant sur les paramètres et descriptions des systèmes, les services d'information sur le PNT et les systèmes et datums géodésiques de référence.

En 2018, les États-Unis ont adopté une [loi relative à la résilience et à la sécurité nationales en matière de synchronisation](#) et, en 2020, un [décret présidentiel concernant le renforcement de la résilience nationale grâce à une utilisation responsable des services PNT](#), ayant pour objectif de «favoriser l'utilisation responsable des services PNT par les propriétaires et exploitants d'infrastructures critiques». Parmi ses nombreuses mesures, le décret présidentiel appelait à mettre en œuvre une source de temps universel coordonné indépendante des GNSS. En 2020, le ministère des transports des États-Unis a procédé à l'[essai de 11 technologies PNT de substitution](#), dans le but d'évaluer des technologies PNT complémentaires et de repli par rapport au système GPS. Cette campagne d'essais a porté tant sur le positionnement que sur la synchronisation et a débouché sur un classement quantifié des différentes technologies analysées.

Le [plan russe de radionavigation](#), publié en 2019 et approuvé par des représentants de 11 nations<sup>3</sup>, analyse les exigences en matière de positionnement et de synchronisation de différents utilisateurs. Il fait état d'une vive préoccupation quant aux perturbations des signaux de GNSS tels que le système GPS et son équivalent russe GLONASS et présente des mesures au moyen desquelles la Russie — avec ses alliés — entend renforcer la sécurité des utilisateurs en intégrant les systèmes spatiaux et terrestres dans une architecture PNT plus solide et plus résiliente. Il confirme en outre une capacité PNT mobile terrestre, susceptible d'être utilisée à des fins militaires.

En cas d'interférence, le plan propose la création d'un système de surveillance des fréquences GNSS et de détection des perturbations, l'utilisation de multiples fréquences du GLONASS et l'intégration des systèmes GLONASS, GPS et terrestres dans le récepteur des utilisateurs: «Un moyen d'intégrer les systèmes de radionavigation terrestres et spatiaux consiste à intégrer des systèmes tels que "Seagull" [Loran] et GLONASS. Les systèmes intégrés "Seagull"/GLONASS pourront à l'avenir être utilisés comme les principaux systèmes de navigation par étapes pour les itinéraires».

Bien que la **Chine** n'ait pas encore publié de plan de radionavigation, elle a présenté son approche à l'occasion de plusieurs conférences et symposiums. Elle prévoit de construire la première [architecture PNT complète](#) au monde (alliant, par exemple, résilience et robustesse). Cette architecture est décrite comme un système PNT multisource qui sera «plus omniprésent, plus intégré et plus intelligent». Centrée sur les satellites de BeiDou en orbite terrestre moyenne (MEO), elle intégrera un large éventail d'autres sources de PNT, comme une constellation PNT en LEO, des [stations Loran-C](#), des capteurs inertiels et des systèmes tels que la navigation quantique encore à développer.

Au Royaume-Uni, un [plan de navigation maritime](#), axé sur l'utilisation des services PNT à des fins de navigation maritime, a été publié en 2016. En 2017, un [rapport](#) a évalué à 5,2 milliards de GBP l'impact économique sur le Royaume-Uni d'une perturbation de cinq jours des GNSS et, en 2020, le Royaume-Uni a annoncé la création d'un [centre national de synchronisation](#) afin de renforcer la résilience des services GNSS, dans le but de garantir une datation précise au moyen d'un réseau d'horloges atomiques hébergées dans des endroits sûrs.

---

<sup>3</sup> Fédération de Russie, République d'Azerbaïdjan, République d'Arménie, République du Tadjikistan, République de Biélorussie, Turkménistan, République du Kazakhstan, République d'Ouzbékistan, République kirghize, Ukraine, République de Moldavie.



### 3 LE PNT DANS L'UE

La présente section examine le PNT dans l'Union européenne, couvrant ainsi les objectifs 6 à 8 énoncés dans la section [1.4](#). Elle vise à donner des **informations détaillées** sur les principaux services fournis par les GNSS européens **Galileo et EGNOS**, à résumer, par segment de marché, les **politiques actuelles de l'UE** en matière de PNT et à présenter les mesures supplémentaires à même de faciliter les services des GNSS européens et/ou de renforcer la résilience des services PNT.

La présente section:

- contient une introduction au cadre juridique de l'UE concernant le programme spatial de l'UE (section [3.1](#));
- décrit les services actuels de Galileo et les projets relatifs aux futurs services en soulignant leur valeur ajoutée par rapport aux autres services GNSS (section [3.2](#));
- décrit les services actuels d'EGNOS et les projets relatifs aux futurs services (section [3.3](#));
- décrit les politiques de l'UE en matière de PNT, y compris les activités en cours visant à faciliter l'introduction des GNSS européens dans les politiques de l'UE (section [3.4](#));
- formule des recommandations pour faciliter l'introduction des services des GNSS européens (section [3.4](#));
- formule des recommandations pour accroître la résilience des services PNT (section [3.4](#));
- décrit les activités de coopération de l'UE en matière de navigation par satellite (section [3.5](#)).

### 3.1 Programme spatial de l'UE 2021-2027

En avril 2021, le Conseil et le Parlement européen ont adopté le [règlement \(UE\) 2021/696 établissant le nouveau programme spatial de l'UE pour les années 2021 à 2027](#). En vertu de ce règlement, le programme spatial de l'UE doit garantir:

- des **données et services** spatiaux de qualité, actualisés et sécurisés;
- de meilleurs **avantages socio-économiques** de l'utilisation de ces données et services, en vue de favoriser la croissance et la création d'emplois dans l'UE;
- un renforcement **de la sécurité et de l'autonomie** de l'UE;
- un rôle plus important pour l'UE en tant qu' **acteur de premier plan** du secteur spatial.

Le règlement simplifie le cadre juridique et le système de gouvernance de l'UE qui étaient en place et harmonise le cadre de sécurité. Il couvre les composantes spatiales de l'UE ci-après:

- **Galileo**: le système mondial de navigation par satellite propre à l'UE, qui fournit des données de positionnement mondial très précises et soutient la réaction d'urgence et les opérations de recherche et de sauvetage;
- le **système européen de navigation par recouvrement géostationnaire (EGNOS)**: le système de renforcement satellitaire (SBAS) régional de l'UE, qui fournit des services de navigation critiques et sûrs aux utilisateurs des secteurs aéronautique et maritime et aux utilisateurs terrestres dans l'ensemble de l'UE;
- **Copernicus**: le programme européen d'observation de la Terre. Grâce à ses services d'observation des sols, des mers, de l'atmosphère et du changement climatique et à ses services de gestion des situations d'urgence et de sécurité, Copernicus soutient un large éventail d'applications, notamment pour la protection de l'environnement, la gestion des zones urbaines, l'aménagement régional et local, l'agriculture, la sylviculture, la pêche, la santé, les transports, le changement climatique, le développement durable, la protection civile et le tourisme;
- **surveillance de l'espace (SSA)**: initiative de l'UE visant à surveiller les actifs spatiaux et à les protéger des risques spatiaux;
- **télécommunications gouvernementales par satellite (Govsatcom)**: initiative de l'UE visant à donner aux autorités nationales un accès à des télécommunications par satellite sécurisées.

En outre, [en février 2022, la Commission européenne a présenté deux nouvelles initiatives phares dans le domaine de l'espace](#):

- une **proposition de règlement relatif à une connectivité spatiale sécurisée (IRIS<sup>2</sup>)** afin de garantir un accès, dans le monde entier, à des services de télécommunications par satellite sécurisés d'un bon rapport coût-efficacité par l'intermédiaire d'une nouvelle constellation, pour les télécommunications gouvernementales et à des fins commerciales. L'objectif est de protéger les infrastructures critiques, de soutenir la surveillance et la gestion des crises et de permettre le haut débit partout en Europe, afin d'anticiper au mieux les défis futurs qui attendent notre économie. À la fin de 2022, le Parlement européen et les États membres sont parvenus à un accord politique sur cette initiative;
- une **communication conjointe sur une approche de l'UE concernant la gestion du trafic spatial** afin de renforcer encore les capacités de l'UE en matière de surveillance de l'espace et de suivi des objets en orbite (et d'établir des normes et une réglementation claires pour une utilisation sûre, durable et sécurisée de l'espace).

Le programme spatial de l'UE est mis en œuvre en étroite coopération avec les États membres, l'Agence de l'Union européenne pour le programme spatial (EUSPA), l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (EUMETSAT) et d'autres parties prenantes.

De plus amples informations sur le programme spatial de l'UE sont disponibles sur la page [EU Space Programme \(europa.eu\)](#).

## 3.2 Services de Galileo

**Galileo** est le **système mondial de navigation par satellite de l'UE**. Il fournit un service de positionnement mondial hautement précis et garanti, sous contrôle civil. Tout en fournissant des services autonomes de navigation et de positionnement, Galileo est interopérable avec d'autres GNSS tels que les systèmes GPS, GLONASS et BeiDou.

Galileo est constitué d'un segment spatial, composé d'une constellation de satellites en orbite terrestre moyenne (MEO) diffusant des signaux de positionnement et de synchronisation, d'un segment terrestre, qui contrôle le fonctionnement des satellites et génère les informations de navigation à transmettre dans les signaux Galileo, et d'un segment utilisateur, composé de terminaux utilisateurs présents dans le monde entier. Galileo est **opérationnel depuis le 15 décembre 2016** et évolue constamment dans le cadre de sa première génération, tandis que la deuxième génération de Galileo est en développement.

Les services fournis par Galileo comprennent:

- un **service ouvert (OS) Galileo**, qui est gratuit pour les utilisateurs et fournit des informations de positionnement et de synchronisation destinées principalement aux applications de masse de la navigation par satellite à l'usage des consommateurs. Cela inclut le service d'authentification des messages de navigation en libre service de Galileo (OSNMA) et des capacités de volume de services;
- un **service haute précision (HAS)**, qui est gratuit pour les utilisateurs et fournit, par l'intermédiaire de données additionnelles diffusées dans une bande de fréquence supplémentaire, des informations de positionnement et de synchronisation de haute précision destinées principalement à des applications de navigation par satellite à des fins professionnelles ou commerciales;
- un **service d'authentification des signaux (SAS)**, basé sur les codes cryptés contenus dans les signaux, destiné principalement à des applications de navigation par satellite à des fins professionnelles ou commerciales;
- un **service public réglementé (PRS)** réservé aux utilisateurs autorisés par les gouvernements, pour les applications sensibles qui exigent un niveau élevé de continuité du service, y compris en matière de sécurité et de défense, utilisant des signaux robustes et cryptés;
- un **service d'urgence (ES)**, qui est gratuit pour les utilisateurs et qui diffuse, au moyen de l'émission de signaux, des alertes concernant des catastrophes naturelles ou d'autres situations d'urgence dans des zones particulières;
- un **service de datation (TS)**, qui est gratuit pour les utilisateurs et qui fournit un temps de référence précis et fiable, et permet la réalisation du temps universel coordonné, facilitant le développement d'applications de datation basées sur Galileo et l'utilisation dans des applications critiques.

Galileo contribue également:

- au service **de recherche et de sauvetage (SAR)** du système COSPAS-SARSAT en détectant les signaux de détresse transmis par des balises et en renvoyant des messages à celles-ci via une voie retour;
- aux **services de contrôle d'intégrité** normalisés à l'échelle de l'Union ou au niveau international aux fins d'une utilisation par des services de sauvegarde de la vie, sur la base des signaux du service ouvert de Galileo et en combinaison avec EGNOS et d'autres systèmes de navigation par satellite;
- aux informations **météorologiques spatiales** via le centre de services GNSS et aux services d'alerte rapide via l'infrastructure au sol de Galileo, destinés principalement à réduire les risques potentiels pour les utilisateurs des services fournis par Galileo et d'autres systèmes GNSS qui sont liés à la dimension spatiale.

Chacun des services sera décrit plus en détail dans les sections suivantes.

De plus amples informations sur Galileo sont disponibles sur la page [European GNSS Service Centre \(gsc-europa.eu\)](https://gsc-europa.eu).

### 3.2.1 Service ouvert (OS) Galileo

Le service ouvert Galileo fournit des **services de mesure de distance, de positionnement et de synchronisation à l'échelle mondiale** aux utilisateurs monofréquences et bifrécquences équipés d'un récepteur compatible avec ledit service ouvert Galileo. Tandis que chaque satellite de Galileo transmet des signaux de navigation (également appelés «signaux dans l'espace», ou SIS pour «Signal-In-Space») dans trois bandes de fréquences, le service ouvert Galileo est **diffusé sur deux** des trois **bandes de fréquences**.

Les [documents de programme relatifs au service ouvert Galileo](#) comprennent les ouvrages suivants:

- **Service ouvert Galileo — Document définissant le service**, qui décrit les caractéristiques et les performances du service ouvert Galileo fourni par l'intermédiaire de ses SIS;
- **Service ouvert Galileo — Document de contrôle d'interface des signaux dans l'espace**, qui contient des informations accessibles au public sur les SIS de Galileo et des spécifications relatives à l'interface entre le segment spatial de Galileo et son segment utilisateur. Ce document est destiné à être utilisé par la communauté des utilisateurs de Galileo;
- **Algorithme de correction ionosphérique pour les utilisateurs monofréquences de Galileo**, qui décrit en détail l'algorithme de référence à mettre en œuvre dans les récepteurs utilisateurs pour calculer les corrections ionosphériques sur la base des coefficients de diffusion des messages de navigation de Galileo pour les utilisateurs monofréquences.

Des [rapports trimestriels sur les performances du service ouvert Galileo](#) fournissent des informations détaillées sur les performances de ce service au regard des objectifs en matière de niveaux minimaux de performance (MPL) spécifiés dans le document définissant le service ouvert Galileo.

La **précision de mesure de distance et de positionnement du service ouvert Galileo dépasse de loin ce que l'on observe pour les autres GNSS**, le service ouvert Galileo affichant pour la précision de mesure de distance une marge n'excédant pas 30 centimètres (95 %) et pour la précision de positionnement horizontal et vertical des marges n'excédant pas, respectivement, 2 mètres et 2,5 mètres (en moyenne). Le degré de **précision du service de synchronisation** est inférieur à 5 nanosecondes (95 %). Des signaux sains du service ouvert Galileo sont disponibles plus de 99 % du temps pour les satellites opérationnels. Les performances habituelles sont présentées dans les [rapports sur les performances de Galileo](#), qui contiennent des statistiques relatives aux erreurs GNSS courantes en matière de mesure de distance.

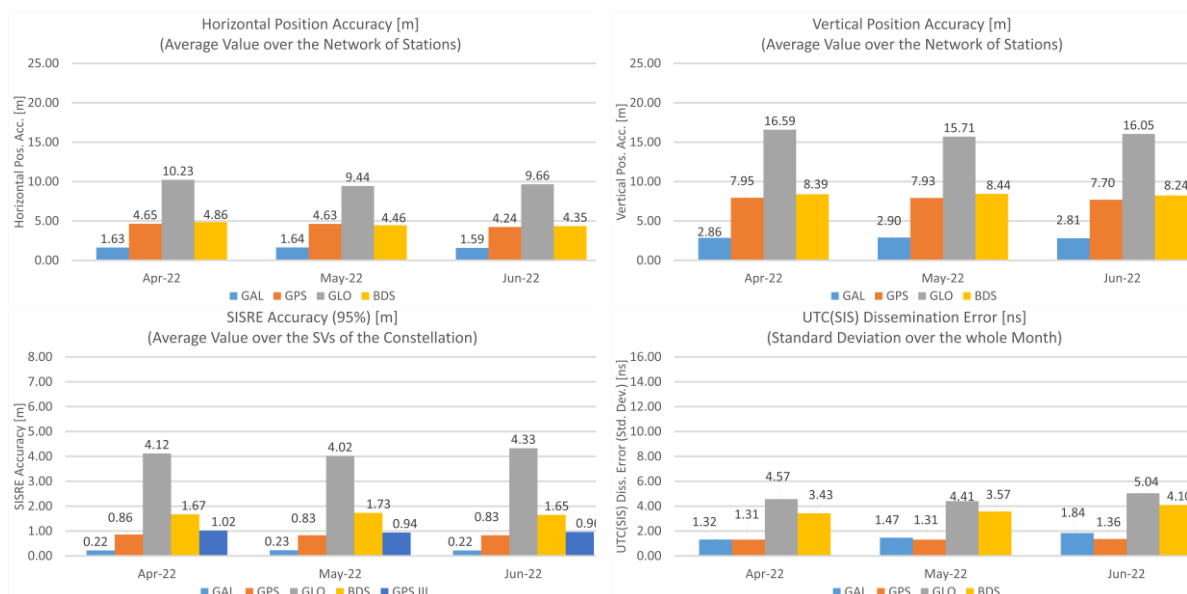


Illustration 8 — Précision du positionnement / synchronisation de Galileo en comparaison avec d'autres GNSS

De plus amples informations sur le service ouvert Galileo sont disponibles dans le document [Service ouvert Galileo — Document définissant le service](#).

### 3.2.1.1 Service d'authentification des messages de navigation en libre service (OSNMA)

Dans le cadre d'un ensemble de services innovants destinés à ajouter des capacités d'authentification, une fonctionnalité unique dénommée «Service d'authentification des messages de navigation en libre service» (OSNMA) est introduite dans Galileo. Ce service vise à répondre à la nécessité manifeste de trouver des **solutions GNSS plus robustes et plus fiables**. Les utilisateurs peuvent bénéficier de cette capacité renforcée de Galileo au moyen d'un récepteur ou d'un terminal utilisateur GNSS capable de traiter les données d'OSNMA.

OSNMA est une fonction d'**authentification des données** sur la base d'opérations cryptographiques, librement accessible aux utilisateurs du monde entier et offrant aux récepteurs l'assurance que les données de navigation de Galileo reçues proviennent bien de ce système et n'ont pas été modifiées. Ce service augmente les probabilités de détecter les attaques de leurrage au niveau des données et contribue ainsi de manière significative à la **sécurité de la solution**. Les données d'OSNMA, qui sont en partie imprévisibles, peuvent également être exploitées par les récepteurs pour assurer un certain niveau de protection contre les attaques par répétition de signaux.

OSNMA permet d'authentifier plusieurs jeux de données de Galileo au moyen d'un message spécifique transmis dans le message de navigation **I/NAV** diffusé sur la composante du **signal E1-B**.

Tableau 2 — Objectifs d'OSNMA de Galileo en matière de performances

| Caractéristique  | OSNMA  |
|--|--|
| Capacités minimales des récepteurs GNSS                          | Monofréquence E1   |
| Objet de l'authentification                                      | Données de navigation (E1B I/NAV et E5b I/NAV)   |
| Composantes requises   | E1B  |
| Nécessité d'un stockage des signaux GNSS bruts du côté récepteur | Nécessité de données I/NAV   |
| Décryptage des signaux de navigation par le récepteur GNSS       | Non  |
| Authentification   | Données d'horloge et d'éphémérides (CED), correction ionosphérique, retard de groupe de la diffusion (BDG), signalements d'état et paramètres de synchronisation [décalage de temps GPS vers Galileo (GGTO) et UTC], retards |
| Délai d'obtention de la première authentification                | D'une à quelques minutes   |
| Disponibilité de l'authentification                              | Élevée, un taux de plus de 95 % étant attendu  |
| Autres prescriptions   | Synchronisation du temps   |

La **phase d'essai public d'OSNMA a débuté en 2021**. Elle permet aux fabricants de récepteurs, aux développeurs d'applications ou aux chercheurs de mettre en œuvre et de tester le protocole et de fournir un retour d'information au programme Galileo. La **déclaration de service** d'OSNMA est attendue **pour la fin de 2023**.

La deuxième génération de Galileo (**G2G**) **améliorera la portée et la robustesse** des capacités d'authentification d'OSNMA et les complétera par un service d'authentification de la mesure de distance.

De plus amples informations sur OSNMA de Galileo sont disponibles dans [le document de contrôle d'interface des utilisateurs d'OSNMA](#) et dans [les lignes directrices relatives aux récepteurs OSNMA](#).



### 3.2.1.2 Volume des services spatiaux

Conçus à l'origine pour fournir des services de positionnement, de navigation et de synchronisation aux utilisateurs terrestres, les **GNSS** ont également fait leurs preuves en tant qu'**outils précieux pour les applications spatiales**. La navigation des véhicules spatiaux en temps réel sur la base de récepteurs GNSS satellitaires est en train de se généraliser pour les orbites terrestres basses (LEO) et les orbites géostationnaires (GEO), ce qui permet aux **satellites de déterminer par eux-mêmes leur position à l'aide des GNSS**, réduisant ainsi leur dépendance à l'égard des stations terrestres. Le fait de tirer des mesures d'**observation de la Terre** des signaux GNSS devient aussi de plus en plus courant et vient s'ajouter à la liste des usages établis et potentiels des GNSS dans l'espace extra-atmosphérique.

Face au nombre sans cesse croissant de véhicules spatiaux et à l'évolution continue des solutions GNSS satellitaires, Galileo proposera un service aux utilisateurs du secteur spatial, le **volume des services spatiaux Galileo (SSV)**, dans le cadre de la deuxième génération de Galileo. Ce service couvrira trois régions.

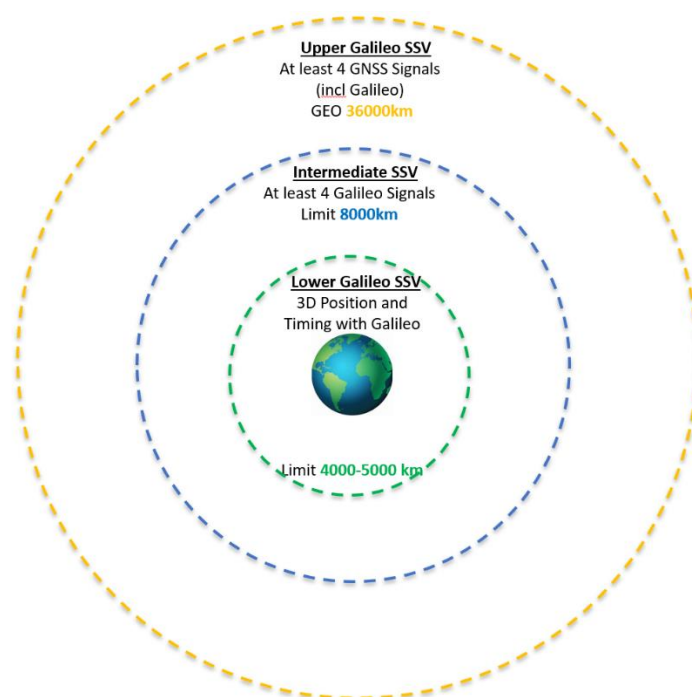


Illustration 9 — Régions couvertes par le volume des services spatiaux Galileo

Le **volume des services spatiaux** Galileo fournira un **service autonome jusqu'à environ 8 000 kilomètres d'altitude** (soit une altitude supérieure aux 3 000 kilomètres du volume des services spatiaux du système GPS) grâce aux orbites plus hautes des satellites de Galileo. Pour les altitudes plus élevées, une solution de volume de services spatiaux multiconstellation fondée sur les GNSS sera nécessaire. Cela [répondra à la plupart des besoins des utilisateurs du secteur spatial en matière de performance des services de positionnement et de synchronisation](#).

Par ailleurs, la communauté internationale œuvre à la **définition d'un volume de services spatiaux GNSS interopérables**, sur la base des résultats des travaux menés au sein du [groupe de travail B du comité international sur les GNSS des Nations unies \(ICG\)](#). Dans le cadre de ses activités actuelles, ce groupe de travail analyse l'opportunité d'élaborer des normes pour appuyer les utilisateurs des GNSS dans le secteur spatial.

### 3.2.2 Service haute précision (HAS)

Galileo est la première constellation GNSS à fournir un **service de positionnement haute précision à l'échelle mondiale** pour des applications qui nécessitent des performances supérieures à celles du service ouvert Galileo. Le service haute précision de Galileo repose sur la fourniture de corrections par positionnement ponctuel précis (PPP) (orbite, horloge, biais, corrections atmosphériques) à un débit maximal de 448 bps par satellite de Galileo connecté à une station de liaison montante, ce qui permet aux utilisateurs d'obtenir une marge d'erreur de **positionnement horizontal inférieure à 20 centimètres (95 %)** dans des conditions d'utilisation nominales.

Le service haute précision de Galileo comprend deux niveaux de services:

- le **niveau de service 1 (SL1)**, de **couverture mondiale**, qui fournit avec un degré de précision élevé des corrections (orbites, horloges) et des biais (code et phase) pour les signaux Galileo et GPS;
- le **niveau de service 2 (SL2)**, de **couverture régionale**, qui fournit des **corrections de niveau SL1 ainsi que des corrections atmosphériques** (à tout le moins ionosphériques) et des biais supplémentaires.

Parallèlement aux corrections du service haute précision de Galileo transmises par le signal dans l'espace (E6b), il est prévu de **distribuer les corrections également au moyen d'un canal terrestre**, dans le but de fournir aux utilisateurs (au niveau tant SL1 que SL2) une source d'entrée de substitution ou complémentaire par rapport au signal dans l'espace.

Le service haute précision de Galileo sera mis en œuvre en deux phases:

- une phase de **fonctionnement initial**, déclarée le 24 janvier 2023: fourniture du niveau de service 1 avec des performances réduites car reposant uniquement sur le traitement des données de Galileo;
- une phase de **régime de croisière** à compter de 2026: fourniture des niveaux de services 1 et 2 permettant d'atteindre les performances visées.

*Tableau 3 — Objectifs du service haute précision de Galileo en matière de performances*

| Caractéristique du HAS                               | Phase 1 (fonctionnement initial)                     | Phase 2 (régime de croisière)                              |
|--|--|--|
| <b>Couverture</b>                                    | SL1: UE  | SL1: territoire mondial<br>SL2: UE                         |
| <b>Type de corrections</b>                           | PPP — orbite, horloge, biais (code et phase)         | SL1: idem phase 1<br>SL2: SL1 + corrections atmosphériques |
| <b>Format des corrections</b>                        | Format ouvert semblable au format Compact SSR (CSSR) | idem phase 1   |
| <b>Constellations et fréquences prises en charge</b> | Galileo E1/E5a/E5b/E6; E5 AltBOC<br>GPS L1/L5; L2C   | idem phase 1   |
| <b>Précision horizontale/verticale — 95 %</b>        | < 20 cm / < 40 cm                                    | idem phase 1   |
| <b>Délai de convergence</b>                          | < 300 s  | SL1: < 300 s<br>SL2: < 100 s                               |
| <b>Disponibilité</b>                                 | > 99 %   | idem phase 1   |

La deuxième génération de Galileo (**G2G**) améliorera le service haute précision en fournissant des **corrections d'orbite et d'horloge dans des autres bandes** en sus de la bande E6 et en **renforçant plusieurs aspects**, notamment en augmentant le débit binaire, en accélérant l'acquisition de constellations GNSS supplémentaires et en raccourcissant le délai de convergence.

De plus amples informations sur le service haute précision de Galileo sont disponibles dans [le document de contrôle d'interface des signaux dans l'espace du service haute précision de Galileo, la note d'information sur le service haute précision de Galileo et sur la page du centre de services GNSS consacrée au service haute précision.](#)

### 3.2.3 Service d'authentification commercial (CAS)/Service d'authentification des signaux (SAS)

Le service d'authentification commercial de Galileo repose sur le **cryptage complet du signal E6C** et permet une **authentification de la PVT de l'utilisateur** sur la base de données de mesure de distance E6C cryptées et de données de navigation authentifiées d'OSNMA. Ce service sera fourni en mode semi-assisté (CAS assisté, ou **ACAS**).

Le concept d'ACAS, qui garantit à l'utilisateur une **autonomie entre les connexions au serveur** (pendant des heures ou des jours selon l'utilisateur), repose sur OSNMA et exige donc que le récepteur soit globalement synchronisé avec le temps du système Galileo.

Les capacités d'authentification de mesure de distance reposent sur la récupération, sur le serveur, de répliques du signal E6C qui ont été recryptées à l'aide d'une clé OSNMA, puis sur le stockage d'instantanés du signal E6C transmis à des moments prédéfinis et, une fois que la clé OSNMA a été divulguée, sur le décryptage des répliques du signal E6C et sur la corrélation avec les instantanés, l'objectif étant d'obtenir des mesures de distance authentifiées a posteriori.

Le service d'authentification commercial de Galileo sera mis en œuvre en deux phases avec les objectifs suivants:

- une phase de **fonctionnement initial** à compter de 2024, au cours de laquelle les services d'ACAS seront fournis sur la base des capacités de Galileo déjà existantes ou en développement (cryptage E6C, OSNMA) et complétés par des services d'assistance intégrés dans les installations de services de Galileo;
- une phase de **régime de croisière** à compter de 2026, avec l'achèvement du déploiement des infrastructures au sol.

En outre, une évaluation de la faisabilité d'un service d'authentification commercial autonome (**SCAS**), fondée sur des analyses de marché et tenant compte de l'adoption de l'ACAS, est en cours. Un tel service nécessiterait le stockage dans le récepteur d'une clé secrète symétrique et permettrait une authentification en temps réel.

Les performances de ces capacités d'authentification seront améliorées sous la deuxième génération de Galileo et le nom sera changé en «**service d'authentification des signaux**» (**SAS**).

De plus amples informations sur le service d'authentification commercial de Galileo sont disponibles sur le [site web du centre européen de services GNSS](#).

### 3.2.4 Service public réglementé (PRS)

Le service public réglementé de Galileo est un **service de navigation crypté** destiné aux utilisateurs autorisés par les gouvernements et aux applications sensibles qui exigent un niveau élevé de continuité. Il s'agit du service le plus sécurisé de Galileo, qui fournit aux utilisateurs autorisés des **capacités PNT illimitées et ininterrompues à l'échelle mondiale**, même dans les situations de crise.

L'accès au service public réglementé de Galileo est **réservé à ses usagers**, qui sont les États membres, le Conseil européen, la Commission européenne et le Service européen pour l'action extérieure, ainsi que les agences de l'Union européenne, les pays tiers et les organisations internationales, pour autant qu'ils aient été dûment autorisés. Les pays tiers et les organisations internationales peuvent devenir des usagers du PRS sous réserve de la conclusion d'accords internationaux (les modalités d'accès au PRS de Galileo sont établies en vertu de la [décision n° 1104/2011/UE](#)).

Les **États membres jouissent d'une pleine souveraineté en ce qui concerne les utilisateurs nationaux** autorisés à accéder au service public réglementé de Galileo ainsi que les cas d'utilisation et les domaines d'application.

Seules les entités autorisées par le [conseil d'homologation de sécurité](#) peuvent développer et fabriquer des **récepteurs utilisateurs compatibles avec le PRS de Galileo**. Les équipements et technologies utilisés pour le PRS de Galileo sont soumis à des contrôles à l'exportation.

Le service public réglementé de Galileo se trouve à un stade de **fonctionnement initial depuis décembre 2016**, y compris à des fins de démonstration, de soutien au développement technologique du segment utilisateur du PRS et d'adoption par les utilisateurs.

De plus amples informations sur le service public réglementé de Galileo sont disponibles sur [la page du centre de services GNSS consacrée à ce service](#) et sur la page [PRS de Navipedia](#).

### 3.2.5 Service d'urgence (ES)

Le service d'urgence de Galileo, également appelé «service d'alerte d'urgence» (EWS), incorporera dans les signaux Galileo des **messages d'alerte destinés à la population menacée par des catastrophes naturelles ou d'autres situations d'urgence**. Les récepteurs Galileo présents dans les différents appareils (téléphones intelligents, montres intelligentes, terminaux mobiles, panneaux d'affichage, etc.) recevront et décodent ces messages d'alerte et les afficheront sur leur écran à des fins d'information immédiate.

Ce service fournit un **mécanisme supplémentaire** permettant aux autorités de protection civile d'alerter la population et soutient directement les objectifs fixés dans le [«cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe» des Nations unies](#).

Le service d'urgence de Galileo présente les **caractéristiques principales** suivantes:

- couverture mondiale;
- diffusion via la bande de fréquences E1 de Galileo (et ultérieurement aussi via la bande de fréquences E5);
- résistance aux destructions des sols, ce service étant indépendant des réseaux de communication terrestres;
- couverture multirisque (couvrant, par exemple, les tornades, les tremblements de terre, les catastrophes nucléaires ou les attentats terroristes);
- rapidité de diffusion auprès de la population (de 2 à 3 minutes) quelle que soit la taille de la zone;
- indication de l'heure de début de la situation d'urgence et de sa durée escomptée et fourniture de conseils aux citoyens;
- diffusion ciblant uniquement la population concernée grâce à la géolocalisation encodée dans le message;
- interopérabilité conçue en coopération avec le Japon et l'Inde.

Le **concept opérationnel** du service d'urgence de Galileo est le suivant (voir illustrations ci-après):

- les centres d'urgence nationaux autorisés génèrent un message d'alerte et l'envoient au système Galileo au moyen d'une interface sécurisée ad hoc;
- le système Galileo génère un message d'alerte d'urgence avec une ellipse entourant la zone ciblée. Ce message est envoyé vers deux satellites de Galileo et acheminé vers la Terre via les messages de navigation de Galileo. Le message d'alerte sera également mis à disposition sur un serveur, à des fins d'utilisation ultérieure et de suivi/d'archivage;
- le segment utilisateur, muni d'un équipement compatible avec le service d'urgence de Galileo, reçoit, décode et affiche le message d'urgence. Ce message est affiché uniquement sur les écrans des utilisateurs situés à l'intérieur de la zone d'urgence.

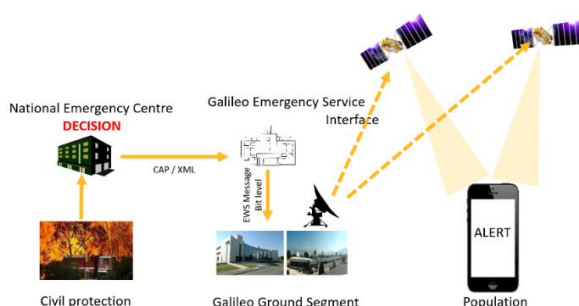


Illustration 10 — Concept opérationnel



Illustration 11 — Ellipse entourant la zone ciblée

Une **phase de démonstration publique** est attendue en **2023**, tandis que le **service d'urgence de Galileo** sera actif à **partir de la fin de 2024** et évoluera au cours de la deuxième génération de Galileo.



### 3.2.6 Service de datation (TS)

Bien qu'ils représentent un petit marché, les services de synchronisation revêtent une **importance capitale pour les secteurs des infrastructures critiques** tels que ceux des télécommunications, de l'énergie et de la finance. La synchronisation est également exploitée dans de nombreux autres domaines, comme l'aviation, la métrologie, la télédétection et la recherche atmosphérique.

Le service de datation de Galileo (TS) fournira un **temps de référence précis et fiable**, et permettra la **réalisation du temps universel coordonné**, facilitant le développement d'applications de datation basées sur Galileo et l'utilisation dans des applications critiques.

Le service ouvert Galileo permet déjà l'horodatage d'un événement sur la base de l'heure du système Galileo et du temps universel coordonné (UTC). En outre, les **sources de synchronisation peuvent être synchronisées** entre elles (et par rapport à une référence temporelle absolue) au moyen de [techniques de distribution horaire](#).

Le service de datation de Galileo élargira les capacités actuelles du service ouvert Galileo afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs. Il présentera les **grandes caractéristiques** suivantes:

- synchronisation à des **niveaux de précision plus élevés** grâce à l'heure du système Galileo par rapport à ce que l'on observe pour d'autres GNSS. Le niveau habituel actuel du degré de précision de la synchronisation est inférieur à 5 nanosecondes (95 %) et ce résultat sera maintenu, voire amélioré, par le développement de la deuxième génération de Galileo;
- renforcement de la robustesse et de la confiance dans le service de datation de Galileo, car il s'agira du premier GNSS à:
  - bénéficier de l'[authentification](#) des messages de navigation de Galileo,
  - fournir des [signalements spécifiques](#) aux utilisateurs de la synchronisation de Galileo,
  - mettre en œuvre un [suivi spécifique](#) articulé en différents niveaux de surveillance.

En complément du service de datation de Galileo, une **norme européenne applicable aux récepteurs de synchronisation GNSS** sera élaborée. Il s'agira de la toute première norme applicable aux récepteurs de synchronisation et elle deviendra un élément fondamental pour garantir aux utilisateurs la bonne performance de bout en bout du service de datation de Galileo.

Le service de datation de Galileo sera fourni dans le cadre de la deuxième génération de Galileo, à compter de **2026**.

### 3.2.7 Contribution au service de recherche et de sauvetage (SAR)

Le soutien apporté par Galileo au service de recherche et de sauvetage (SAR) représente la **contribution de l'Europe au programme international COSPAS-SARSAT**, un effort de coopération en matière d'activités humanitaires de recherche et de sauvetage. Le service de recherche et de sauvetage détecte et localise les balises radio d'urgence activées par des personnes, des aéronefs ou des navires en détresse et transmet cette alerte aux autorités, qui lancent les opérations de sauvetage. Par sa contribution à ce service, Galileo réduit considérablement (**à moins de 10 minutes**) le temps nécessaire pour détecter une balise de détresse après son activation et augmente la précision de la localisation (rayon d'incertitude **inférieur à 5 kilomètres**, qui sera inférieur à 100 mètres à l'avenir).

Galileo est le principal contributeur au système de recherche et de sauvetage en orbite terrestre moyenne du programme COSPAS-SARSAT (MEOSAR) par le nombre d'actifs de son segment terrestre et de son segment spatial qu'il met à disposition. En effet, **plus de 24 transpondeurs de recherche et de sauvetage en orbite**<sup>4</sup> et **4 stations terrestres MEOLUT** relayent les signaux de détresse aux autorités de recherche et de sauvetage. Le service de recherche et de sauvetage de Galileo se compose de deux parties:

- le **service de liaison de relais de Galileo**, dans le cadre duquel les transpondeurs de recherche et de sauvetage de Galileo détectent les signaux émis par les balises de détresse dans la bande de 406 MHz et diffusent ces informations vers des stations terrestres ad hoc (MEOLUT) dans la bande L à 1 544,1 MHz. Ces signaux de liaison descendante transmis par les charges utiles des transpondeurs de recherche et de sauvetage de Galileo sont utilisés par les stations MEOLUT pour générer la localisation de la balise, laquelle est ensuite relayée aux premiers intervenants par l'intermédiaire de centres de contrôle de mission spécifiques du programme COSPAS-SARSAT;

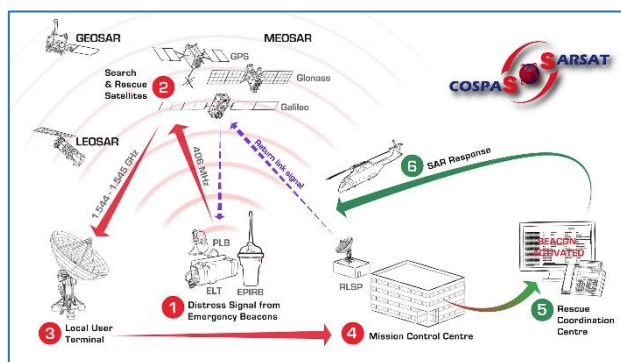


Illustration 12 — Concept opérationnel

- le **service de voie retour de Galileo (RLS)**, qui permet d'envoyer sur le signal de navigation sur la fréquence L1 de Galileo un message de bonne réception à l'utilisateur en détresse pour lui indiquer que son alerte a été détectée et localisée. Ce service possède plusieurs fonctionnalités supplémentaires, telles que l'**activation de la balise à distance** qui permettra aux utilisateurs autorisés (exploitants d'aéronefs, centres maritimes de contrôle du sauvetage) d'activer à distance une balise de détresse en cas, par exemple, de disparition d'un aéronef ou de retard d'un navire. Cette fonctionnalité pour les applications dans le secteur aéronautique a été normalisée dans le [document EUROCAE ED-277](#).

En outre, une **communication bidirectionnelle** par l'intermédiaire du service de voie retour est en cours d'évaluation. Cette fonctionnalité permettra aux opérateurs des services de sauvetage d'échanger des messages au moyen de questions et de réponses précodées et d'envoyer des instructions expliquant comment réagir aux utilisateurs en détresse équipés de balises COSPAS-SARSAT. De même, un futur service de **partage des positions de détresse** permettrait aux opérateurs des services de sauvetage de partager la position d'un utilisateur en détresse avec d'autres utilisateurs situés à proximité afin d'accélérer les opérations de sauvetage.

Le [document définissant le service de recherche et de sauvetage de Galileo](#) décrit les caractéristiques et les performances de ce service, tandis que les [rapports trimestriels sur les performances du service de recherche et de sauvetage de Galileo](#) présentent les performances de ce service au regard des objectifs en matière de niveaux minimaux de performance (MPL) spécifiés dans le document définissant le service de recherche et de sauvetage de Galileo.

<sup>4</sup> En 2022, la Russie comptait deux transpondeurs de recherche et de sauvetage, tandis que, aux États-Unis, le premier transpondeur de recherche et de sauvetage opérationnel sur la bande L utilisera le bloc B du système GPS III — les transpondeurs actuels des États-Unis ne diffusent pas dans la bande de fréquences allouée au programme COSPAS-SARSAT.

De plus amples informations sont disponibles dans le [document définissant le service de recherche et de sauvetage](#) et sur la [page du centre de services GNSS consacrée au service de recherche et de sauvetage](#).

### 3.2.8 Contribution aux services de sauvegarde de la vie

Galileo contribue aux **services de contrôle d'intégrité et services de sauvegarde de la vie** normalisés en transmettant des signaux sur la base de son service ouvert ainsi que des informations spécifiques en combinaison avec des [systèmes de renforcement](#):

- des systèmes de renforcement satellitaire (SBAS) tels qu'EGNOS;
- des systèmes de renforcement fondés sur les aéronefs (ABAS) tels que le contrôle autonome de l'intégrité par le récepteur (RAIM) et le contrôle autonome avancé de l'intégrité par le récepteur (ARAIM);
- des systèmes de renforcement au sol (GBAS).

L'utilisation des signaux GNSS et de leurs services de renforcement est une **technologie fondamentale dans l'aviation** et a été normalisée par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). L'OACI prévoit des évolutions des systèmes de navigation actuels qui tireront parti de l'environnement multiconstellation au moyen de signaux bifréquences (dans les bandes E1 et E5a).

L'**ARAIM** représente l'évolution vers une solution multiconstellation et multifréquence du **RAIM** actuel, qui utilise le système GPS et se limite à une seule fréquence.

La définition du concept d'ARAIM a été élaborée par le groupe de travail C UE/États-Unis, puis formalisée au niveau international dans le cadre du panel des systèmes de navigation (NSP) de l'OACI. Lors de l'élaboration de ce concept, le groupe de travail C UE/États-Unis a publié trois rapports, le dernier étant le [troisième rapport d'étape](#).

L'introduction de l'ARAIM sera progressive:

- tout d'abord, l'**ARAIM horizontal (H-ARAIM)** soutiendra la navigation en route et sera inclus dans la première version des normes minimales de performance opérationnelle (MOPS) des solutions bifréquences et multiconstellations;
- ensuite, l'**ARAIM vertical (V-ARAIM)** soutiendra la navigation verticale en ciblant les opérations d'approche LPV-200.

*Tableau 4 – Comparaison des caractéristiques principales du RAIM et du V-ARAIM*

|                                 | RAIM   | ARAIM  |
|---------------------------------|--|--|
| <b>Opérations</b>               | Jusque RNP 0,1   | LPV-200  |
| <b>Catégorie d'aléa</b>         | Majeur   | Dangereux  |
| <b>Signaux</b>                  | L1CA   | L1CA/E1-L5/E5a   |
| <b>Modèle de menace</b>         | Défaut unique uniquement                               | Défauts multiples  |
| <b>Modèle d'erreur nominale</b> | Modèle gaussien utilisant les signaux transmis par GPS | Modèle gaussien et biais nominal/maximal validé par un contrôle au sol indépendant |
| <b>Constellations</b>           | GPS  | Multiconstellation   |

Les opérations d'ARAIM permettront des approches verticales jusqu'au niveau CAT I/LPV-200 et donc une redondance dans les zones desservies par les SBAS; elles auront également une **couverture mondiale** pouvant soutenir la navigation en Arctique.

Galileo soutient officiellement l'ARAIM grâce aux engagements nécessaires dans le cadre du service ouvert, qui sont reflétés dans les documents de programme relatifs à Galileo (document définissant le service ouvert Galileo, document de contrôle d'interface des signaux dans l'espace) et dans les normes de l'aviation (normes et pratiques recommandées, ou SARP, de l'OACI), le cas échéant.

### 3.2.9 Contribution aux informations météorologiques spatiales

Les **phénomènes météorologiques spatiaux** liés à l'activité solaire et à l'interaction avec la magnétosphère terrestre peuvent affecter les infrastructures au sol et spatiales, ce qui peut entraîner **des perturbations ou une dégradation des performances** des services satellitaires dans le monde entier, causant parfois également des dommages aux équipements et aux systèmes.

Les GNSS peuvent être affectés par les phénomènes électromagnétiques, en particulier ceux qui se produisent dans l'ionosphère. Les effets sur la navigation fondée sur les GNSS peuvent inclure la dégradation du PNT, une perturbation temporaire du positionnement ou de la synchronisation ou encore une perte totale de visibilité d'un ou de plusieurs signaux satellitaires. Compte tenu de la dépendance croissante à l'égard de la navigation par satellite, il devient de plus en plus important d'anticiper les dégradations potentielles et d'en informer/alerter les utilisateurs.

Aujourd'hui, **EGNOS** fournit déjà une modélisation de l'ionosphère en temps réel pour l'Europe, y compris les contenus électroniques totaux (TEC) verticaux et leur direction, tandis que **Galileo** fournit un modèle d'ionosphère en temps réel à l'échelle mondiale, beaucoup plus précis que le modèle de Klobuchar fourni dans le message de navigation GPS.

En outre, Galileo fournira une **capacité intégrée de surveillance et de prévision** de la météorologie spatiale, permettant:

- de quantifier, prédire et prévoir les incidences potentielles des performances GNSS de l'utilisateur final au moyen d'une surveillance et de prévisions concernant:
  - les indices solaires et géomagnétiques, tels que F10.7, R12, Kp, Ap, Dst, en tant que paramètres caractérisant les événements solaires et le flux attendu de particules vers la Terre,
  - les paramètres d'activité ionosphérique, tels que le contenu électronique total et ses dérivés, ainsi que les événements de scintillation,
  - les performances GNSS au niveau de l'utilisateur, telles que les erreurs de positionnement et de synchronisation, et la probabilité de perte de verrouillage;
- d'avertir les utilisateurs des GNSS en temps utile des événements majeurs à venir susceptibles de dégrader ou de perturber les services GNSS, pour permettre ainsi une réaction rapide aux dangers et l'activation de stratégies d'atténuation.

Ce service traitera une **grande quantité de données externes**, qui alimenteront à leur tour les algorithmes de surveillance et de prévision. Font partie des catégories pertinentes de capteurs les réseaux géodésiques (de l'IGS ou de l'EUREF, par exemple), les missions solaires et héliosphériques, les capteurs spatiaux pour les méthodes de données d'occultation radio, d'autres capteurs au sol ou réseaux (d'ionosondes, par exemple) et les données internes de l'infrastructure des systèmes Galileo/EGNOS (les stations de capteurs Galileo, par exemple).

Il existe dans le monde plusieurs plateformes de surveillance générale de la météorologie spatiale, qui fournissent des bulletins à divers utilisateurs du secteur spatial ayant besoin d'être informés de la météorologie spatiale avant de mener leurs opérations: vol spatial habité, lanceurs, surveillance de l'espace, etc. Ce service de Galileo est déployé en tant que **plateforme exclusive à Galileo permettant de prédire les performances pour ses utilisateurs des GNSS**.

Le programme Galileo introduit actuellement cette capacité en tant que plateforme web sur le portail du centre de services Galileo.

La première déclaration de service est prévue en **2024** et des évolutions régulières sont prévues dans la feuille de route afin de tenir compte de l'amélioration des algorithmes de prévision ou de l'apparition de nouvelles méthodes de collecte de données.

### 3.2.10 Feuille de route pour les services de Galileo

L'illustration 13 donne une vue d'ensemble des objectifs de la Commission européenne pour les différents services de Galileo au cours de la période 2023-2025.

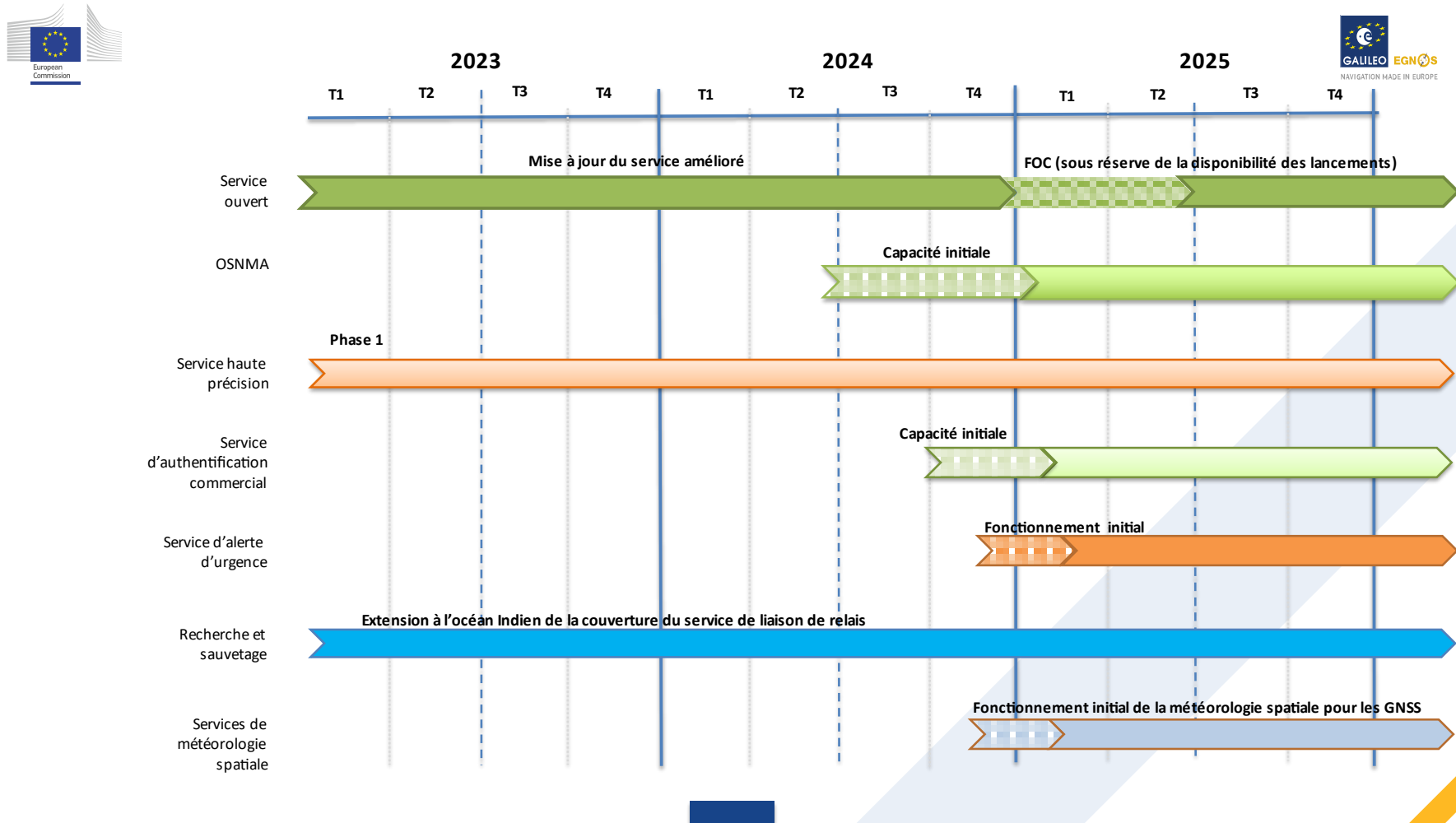


Illustration 13 — Feuille de route pour les services de Galileo

### 3.3 Services d'EGNOS

EGNOS, le système européen de navigation par recouvrement géostationnaire, est le **système de renforcement satellitaire (SBAS) de l'Europe**, qui renforce les services de navigation satellitaire fondés sur le système GPS (et Galileo à l'avenir).

EGNOS est constitué d'un segment spatial (satellites géostationnaires), d'un segment terrestre (stations de référence, stations maîtresses et stations de liaison montante), d'un segment utilisateur (récepteurs utilisateurs traitant les signaux du SBAS) et d'un segment de soutien (pour soutenir la fourniture des services du SBAS).

Les stations de référence d'EGNOS sont principalement réparties géographiquement en Europe et reçoivent des signaux des GNSS, qu'elles transmettent aux stations maîtresses. Étant donné que la localisation des stations de référence est connue avec précision, les stations maîtresses peuvent calculer avec précision des corrections à grande échelle. Ces corrections sont envoyées à des stations consacrées à la liaison montante vers les satellites d'EGNOS, lesquels les diffusent aux récepteurs GNSS dans l'ensemble de la zone couverte par le SBAS.

Les services fournis par EGNOS comprennent:

- un **service ouvert (OS) EGNOS**, qui est sans frais directs pour les utilisateurs et fournit des informations de positionnement et de synchronisation destinées principalement aux applications de masse de la navigation par satellite à l'usage des consommateurs;
- un **service d'accès aux données EGNOS (EDAS)**, qui est sans frais directs pour les utilisateurs et fournit des informations de positionnement et de synchronisation destinées principalement aux applications de la navigation par satellite à des fins professionnelles ou commerciales, offrant des performances accrues et des données d'une valeur ajoutée supérieure à celles procurées par le service ouvert EGNOS;
- un **service de sauvegarde de la vie (SoL)**, qui est sans frais directs pour les utilisateurs et fournit des informations de positionnement et de synchronisation horaire avec un haut degré de continuité, de disponibilité et de précision, y compris une fonction d'intégrité permettant de prévenir les utilisateurs en cas de dysfonctionnement ou de signaux hors tolérance émis par Galileo et d'autres systèmes GNSS qu'EGNOS augmente dans la zone de couverture, et qui est destiné principalement aux utilisateurs pour qui la sécurité est essentielle, notamment dans le secteur de l'aviation civile aux fins de services de navigation aérienne, conformément aux normes de l'OACI, ou d'autres secteurs du transport.

Les **documents définissant le [service ouvert EGNOS](#), le [service d'accès aux données EGNOS](#) et le [service de sauvegarde de la vie](#)** décrivent les caractéristiques et les performances des services d'EGNOS.

Des **[rapports mensuels sur les performances d'EGNOS](#)** fournissent des informations détaillées sur les performances du service ouvert EGNOS, du service d'accès aux données EGNOS et du service de sauvegarde de la vie au regard des objectifs en matière de niveaux minimaux de performance (MPL) spécifiés dans les différents documents définissant ces services.

Les services de la génération d'EGNOS actuelle («EGNOS V2») permettent de renforcer le signal L1 du système GPS.

La deuxième génération d'EGNOS («EGNOS V3») permettra de renforcer les signaux L1 et L5 des systèmes GPS et Galileo. Les **spécifications techniques et opérationnelles d'EGNOS V3** sont établies par une **[décision d'exécution de la Commission](#)**.

De plus amples informations sur chacun des services sont disponibles dans les sections suivantes ainsi que sur le **[site web du prestataire de services d'EGNOS](#)** et dans les différents documents définissant ces services.



### 3.3.1 Service ouvert (OS) EGNOS

Le service ouvert EGNOS, disponible depuis le **1<sup>er</sup> octobre 2009**, fournit des **services de positionnement et de synchronisation** aux utilisateurs monofréquences équipés d'un récepteur compatible avec ce SBAS.

Le principal objectif du service ouvert EGNOS est d'**améliorer la précision de positionnement réalisable sur la base des GNSS** en *renforçant* la précision de mesure de distance des signaux GNSS. L'augmentation de la précision est possible grâce au fait qu'EGNOS corrige différentes sources d'erreurs GNSS en matière de mesure de distance: les horloges ou orbites des satellites et les effets ionosphériques. En outre, EGNOS peut également détecter les distorsions affectant les signaux transmis par les GNSS, empêchant ainsi les utilisateurs de suivre des signaux malsains ou trompeurs susceptibles de conduire à un positionnement inexact.

Les **performances** habituelles du service ouvert EGNOS pour les territoires de l'UE consistent en des marges de précision horizontale et verticale n'excédant pas, respectivement, 3 mètres et 4 mètres (95 %) et en un degré de précision de la synchronisation inférieur à 20 nanosecondes (3 sigma) plus de 99 % du temps.

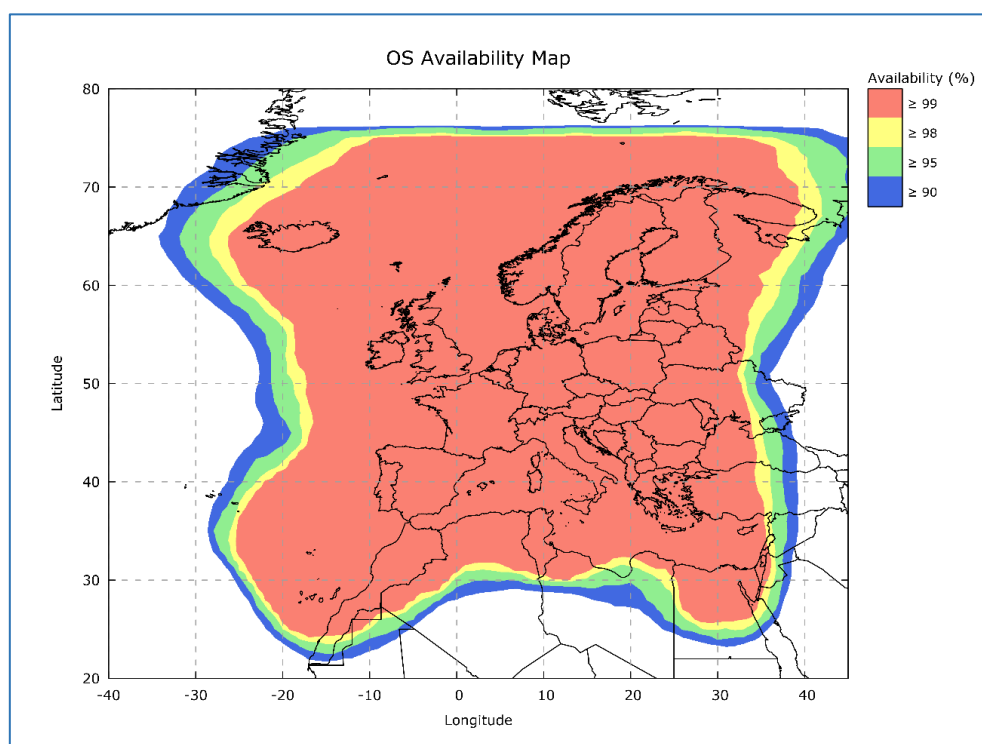


Illustration 14 — Disponibilité du service ouvert EGNOS (source: [document définissant le service ouvert EGNOS](#))

Le service ouvert EGNOS est utilisé à des **fins non critiques pour la sécurité** (c'est-à-dire que l'absence ou l'inexactitude des informations du service ouvert EGNOS ne peut causer aucun dommage direct ou indirect à des personnes, notamment des blessures corporelles ou des décès).

Les principaux **utilisateurs** du service ouvert EGNOS sont l'agriculture de précision, des applications de transport maritime, ferroviaire ou rutier et, en général, toute communauté d'utilisateurs souhaitant obtenir une meilleure précision de positionnement.

### 3.3.2 Service de sauvegarde de la vie (Sol) EGNOS

Le service de sauvegarde de la vie EGNOS fournit le niveau le plus élevé de performance des signaux dans l'espace à toutes les communautés d'utilisateurs de la sauvegarde de la vie, qui ont besoin **de performances renforcées et garanties et d'informations de mise en garde sur l'intégrité**.

Ce service est adapté aux **applications de transport critiques pour la sécurité** et est fourni aujourd'hui au secteur aéronautique; à l'avenir, la communauté maritime et d'autres communautés pourront en bénéficier.

#### 3.3.2.1 Service de sauvegarde de la vie EGNOS pour le secteur aéronautique

L'objectif principal du service de sauvegarde de la vie EGNOS, disponible depuis le **2 mars 2011**, est de soutenir les opérations de l'aviation civile jusqu'aux minima des performances d'alignement de piste avec guidage vertical (LPV) (également appelées «opérations d'approche avec guidage vertical»).

Deux **niveaux de services pour le service de sauvegarde de la vie EGNOS** permettent de mener les opérations basées sur le SBAS ci-dessous dans le respect du document [SARP de l'OACI, annexe 10, volume I](#):

- les opérations d'approche classique (NPA) et les autres opérations aériennes pour garantir les spécifications de la navigation fondée sur les performances (PBN) autres que la qualité de navigation requise RNP APCH, non seulement pour les approches, mais également pour d'autres phases de vol;
- les opérations d'approche avec guidage vertical (APV-I) pour garantir les spécifications RNP APCH de la PNB jusqu'aux minima des LPV jusqu'à une altitude de 250 pieds;
- l'approche de précision de catégorie I avec un seuil d'alarme vertical (VAL) égal à 35 mètres pour garantir les spécifications RNP APCH de la PNB jusqu'aux minima des LPV jusqu'à une altitude de 200 pieds.

L'utilisation opérationnelle du service de sauvegarde de la vie EGNOS peut nécessiter une autorisation spécifique des autorités de l'aviation civile compétentes.

Le service de sauvegarde de la vie EGNOS est accessible à tout utilisateur équipé d'un **récepteur certifié EGNOS**, conformément aux normes minimales de performance opérationnelle (MOPS) des SBAS [DO-229<sup>5</sup>](#) de la RTCA, et situé dans la zone appropriée dudit service correspondant à la phase de vol au cours de laquelle le service de sauvegarde de la vie EGNOS est utilisé (comme indiqué dans le document définissant le service de sauvegarde de la vie EGNOS).

Le signal du service de sauvegarde de la vie EGNOS couvre également des territoires situés en dehors de l'UE. Dans ce cas, l'autorisation de l'utilisation du service de sauvegarde de la vie EGNOS par l'aviation civile et la supervision de la sécurité de cette utilisation relèvent de la seule responsabilité du pays tiers concerné. **L'UE soutient l'utilisation opérationnelle des procédures fondées sur EGNOS** dans les pays tiers affichant un niveau de sécurité équivalent à celui du ciel unique européen, pour autant qu'un accord ait été conclu entre l'UE et le pays tiers sur l'utilisation du service de sauvegarde de la vie EGNOS<sup>6</sup>.

Les **performances** habituelles du service de sauvegarde de la vie EGNOS consistent en une disponibilité dans l'espace aérien européen supérieure à 99,9 % pour le service d'approche classique, et supérieure à 99 % pour les services APV-I et LPV-200 (sauf dans les Açores et certaines parties des îles Canaries, de Chypre et du nord de la Scandinavie).

<sup>5</sup> MOPS DO-229 de la RTCA (révisions C, D modification 1 ou E).

<sup>6</sup> Au début de 2023, des opérations fondées sur EGNOS étaient menées dans les pays tiers suivants: Norvège, Suisse, Bailliage de Guernesey, Bailliage de Jersey, Islande, Serbie et Monténégro.

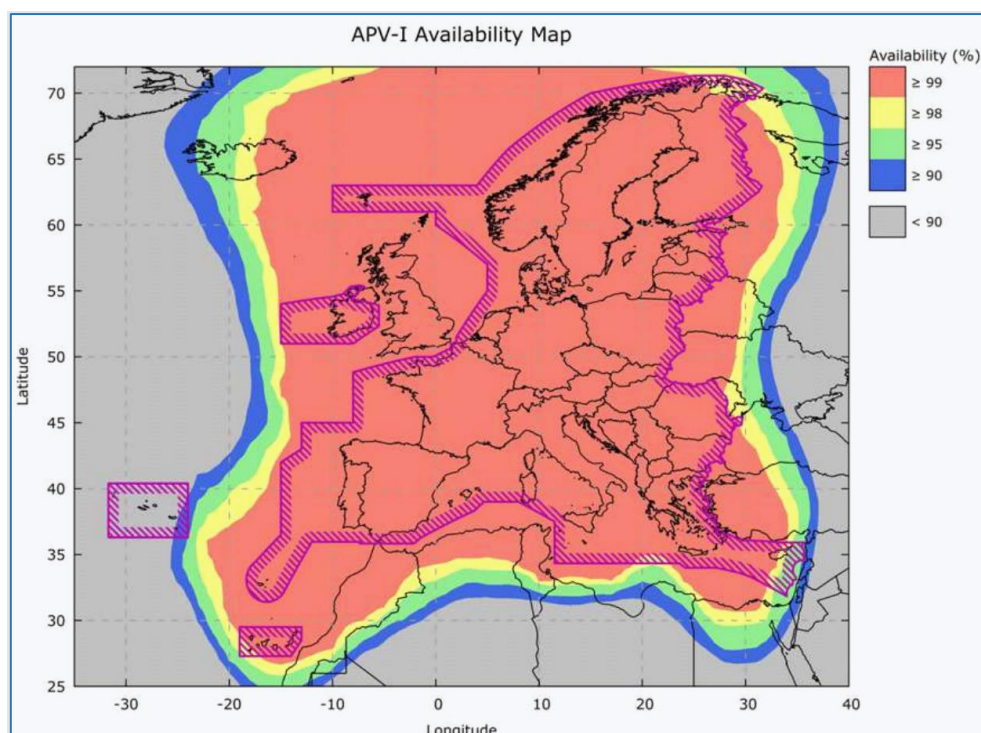


Illustration 15 — Disponibilité du service de sauvegarde de la vie EGNOS (source: [document définissant le service de sauvegarde de la vie EGNOS](#))

EGNOS V3 (c'est-à-dire la prochaine génération d'EGNOS) fournira des services améliorés selon l'approche de mise en œuvre suivante:

- **EGNOS v3.1**, opérationnel avant 2030, vise à garantir le **plein respect des exigences de l'OACI dans tous les territoires de l'UE** lors de l'utilisation des signaux L1 du système GPS;
- **EGNOS v3.2**, opérationnel vers 2030, vise à:
  - fournir des services bifréquences et multiconstellations (bifréquence L1/L5, multiconstellation GPS/Galileo) avec une disponibilité accrue de 99,9 % pour le niveau de service LPV-200 et un nouveau niveau de service ciblant une VAL de 10 mètres, pouvant permettre l'approbation de capacités opérationnelles supplémentaires,
  - étendre les anciens services L1 du système GPS aux territoires du Sud<sup>7</sup> et de l'Est<sup>8</sup> couverts par la politique européenne de voisinage.

En outre, **l'authentification des messages SBAS**, qui est actuellement incluse dans la norme des SBAS bifréquences et multiconstellations, renforcera la résilience des services bifréquences et multiconstellations fondés sur le SBAS.

<sup>7</sup> Algérie, Égypte, Israël, Jordanie, Liban, Libye, Maroc, Palestine et Tunisie.

<sup>8</sup> Arménie, Azerbaïdjan, Biélorussie, Géorgie, Moldavie et Ukraine.

### 3.3.2.2 Service de sauvegarde de la vie EGNOS pour le secteur maritime

La fourniture de services EGNOS aux utilisateurs du secteur maritime est mise en œuvre en trois phases:

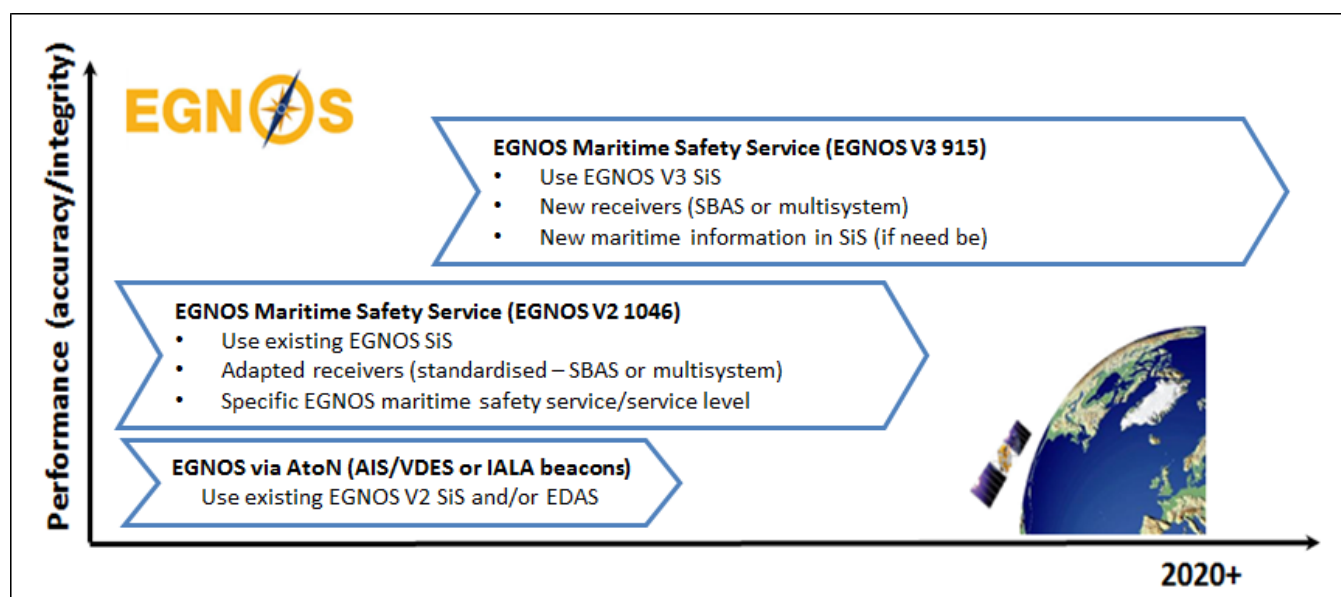


Illustration 16 — Phases de mise en œuvre du service de sauvegarde de la vie EGNOS pour le secteur maritime

#### ▪ Phase 1: corrections d’EGNOS transmises via les aides à la navigation (AtoN) existantes

L’actuel service de sauvegarde de la vie EGNOS sur la bande L1 est utilisé comme source pour les corrections différentielles transmises par les balises et les stations AIS d’aide à la navigation existantes de l’IALA conformément aux [directives G1129 de l’IALA sur la retransmission des corrections SBAS au moyen de balises radio moyenne fréquence et de l’AIS](#).

#### ▪ Phase 2: service maritime EGNOS L1 + récepteurs L1 ad hoc

L’actuel service de sauvegarde de la vie EGNOS sur la bande L1 sera adapté aux utilisateurs du secteur maritime en fournissant les **informations supplémentaires suivantes**:

1. engagements des signaux dans l’espace concernant les erreurs en matière de mesure de distance (orbites et horloge) et les erreurs ionosphériques;
2. alertes d’intégrité (alertes système, alertes satellite, alertes ionosphériques);
3. informations de sécurité maritime pour informer des périodes d’indisponibilité prévues/imprévues.

En outre, une **norme d’essai CEI pour le SBAS dans les récepteurs embarqués à bord d’un navire (CEI 61108-7)** est en cours de conception; cette norme permettra d’obtenir le certificat du type de récepteur pour le traitement du service maritime EGNOS L1.

Ce service sera utilisé par les récepteurs embarqués à bord d’un navire pour calculer une solution de navigation conformément aux exigences opérationnelles énoncées dans la [résolution A.1046 de l’OMI](#) pour la navigation maritime dans les eaux océaniques, les entrées portuaires, les approches portuaires et les eaux côtières.

Tableau 5 — Exigences opérationnelles de la résolution A.1046 de l'OMI

|   | Eaux océaniques  | Entrées portuaires, approches portuaires et eaux côtières |
|---|--|---|
| Précision (95 %)  | 100 m  | 10 m  |
| Intégrité du système (délai de signalisation dysfonctionnement) | Dès que possible par les informations de sécurité maritime | Dans les 10 secondes                                      |
| Disponibilité du signal   | 99,8 %   | 99,8 %  |
| Continuité  | sans objet   | 99,97 % (sur une période de 15 minutes)                   |

La déclaration de ce service maritime EGNOS est prévue pour la **fin de 2023**.

- **Phase 3: service maritime EGNOS bifréquence et multiconstellation + nouveaux récepteurs de radionavigation multisystèmes de bord (MSR) ad hoc**

Le futur service EGNOS bifréquence et multiconstellation permettra d'améliorer la navigation conformément aux résolutions [A.915\(22\)](#) et [A.1046\(27\)](#) de l'OMI dans les entrées portuaires, les approches portuaires et les eaux côtières lorsque les signaux de navigation sont traités par des récepteurs de radionavigation multisystèmes de bord adaptés à cet effet.

### 3.3.2.3 Service ferroviaire EGNOS pour la localisation des trains

L'introduction de services EGNOS couvrant les **applications liées à la sécurité** dans le secteur ferroviaire **devrait accroître la sécurité** et la capacité du réseau ferroviaire, tout en réduisant les coûts d'exploitation.

L'intégration d'EGNOS dans le système européen de gestion du trafic ferroviaire (ERTMS) et la définition de ce service ferroviaire des GNSS européens pour la localisation des trains sont actuellement à l'étude.

### 3.3.3 Service d'accès aux données EGNOS (EDAS)

Le service d'accès aux données EGNOS est le **point unique d'accès terrestre aux données d'EGNOS**, y compris celles qui sont générées par les infrastructures au sol d'EGNOS, essentiellement les stations de télémétrie et de contrôle d'intégrité (RIMS) et les stations terriennes de navigation terrestre (NLES).

Le service d'accès aux données EGNOS est **accessible via l'internet**, que le satellite géostationnaire d'EGNOS soit visible ou non. Cet aspect est particulièrement important dans les canyons urbains, les terrains montagneux et les autres zones dans lesquelles la visibilité des satellites géostationnaires est limitée.

Le service d'accès aux données EGNOS est **accessible aux utilisateurs enregistrés** dans les pays participant à EGNOS (États membres, Norvège, Suisse et Islande) et aux autres utilisateurs après leur enregistrement et leur autorisation par la Commission européenne.

En outre, les infrastructures de transmission existantes dans le secteur de la navigation maritime et intérieure (balises de l'IALA et/ou stations de base AIS) peuvent s'appuyer sur la **retransmission des corrections du système GPS différentiel sur le fondement de l'EDAS**.

Le service d'accès aux données EGNOS est disponible gratuitement depuis le **26 juillet 2012** et ne peut être utilisé qu'à des fins non critiques pour la sécurité.

### 3.4 Politiques de l'UE en matière de PNT et mesures recommandées

La présente section est consacrée aux principales politiques et mesures de l'UE en matière de PNT et contient:

1. un **résumé**, par segment de marché, des **principales initiatives de l'UE en matière de PNT**, mettant en avant le rôle des services des GNSS européens;
2. des **recommandations**, notamment en matière de réglementation ou de normalisation, pour:
  - faciliter l'utilisation de Galileo et d'EGNOS dans les segments de marché concernés,
  - accroître la résilience des services PNT, notamment pour les infrastructures critiques.

La présente section traite également du point c) de la recommandation n° 4 du [rapport spécial n° 07/2021](#) de la Cour des comptes européenne. Le calendrier de chaque segment de marché concerné pour lequel la réglementation ou la normalisation peuvent faciliter l'utilisation de Galileo est détaillé à l'[APPENDICE C: Réglementations et normes](#). Les futures versions de l'ERNP refléteront l'évolution de l'utilisation de Galileo dans différents segments de marché.

Préalablement à l'examen des politiques de l'UE en matière de PNT par segment de marché, l'[Illustration 17](#) montre les utilisations habituelles des systèmes PNT dans les différents segments de marché:

- en commençant par le **cercle intérieur**, les services des **GNSS mondiaux et régionaux** sont aujourd'hui largement utilisés dans tous les segments de marché et peuvent être considérés comme la clé de voûte de tous les services PNT. Leur utilisation répandue s'explique par le coût relativement faible, les performances exceptionnelles et la facilité d'utilisation des récepteurs GNSS;
- le deuxième cercle montre les services des systèmes de **renforcement des GNSS**, qui desservent également tous les segments de marché et améliorent les performances pour les services à valeur ajoutée (par exemple, intégrité pour les applications de sauvegarde de la vie ou haute précision du PPP);
- le cercle extérieur montre que les systèmes **PNT conventionnels** sont utilisés principalement dans les secteurs aéronautique et maritime, tandis que les **technologies émergentes** ont le potentiel de desservir tous les segments de marché, y compris dans les environnements dans lesquels l'utilisation des services GNSS est plus difficile (à l'intérieur des bâtiments, par exemple).

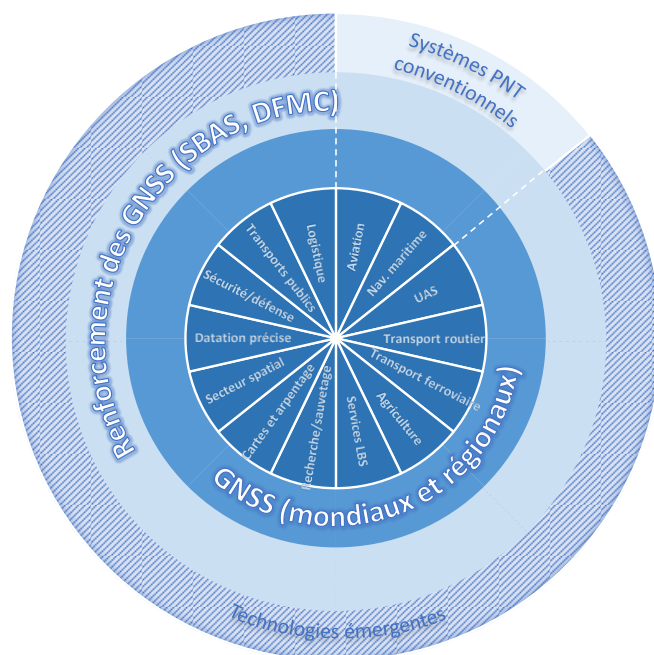


Illustration 17 — Vue d'ensemble des technologies par domaine



### 3.4.1 Résilience des infrastructures critiques européennes

Garantir la **résilience des entités qui utilisent des infrastructures critiques pour fournir des services essentiels** demeure une priorité de l'Union européenne et de ses États membres. La [stratégie de l'UE pour l'union de la sécurité](#) pour la période 2020-2025 et le [programme de lutte antiterroriste pour l'UE](#) soulignent tous les deux l'importance de garantir la résilience des infrastructures critiques face aux risques physiques et numériques. La pandémie de COVID-19 a mis en évidence les menaces complexes majeures qui pèsent sur les services dont dépendent la vie des citoyens européens et le bon fonctionnement du marché intérieur. La résilience des infrastructures critiques est mise en lumière dans des déclarations politiques de premier plan, telles que la [déclaration de Versailles](#) des dirigeants de l'UE.

La [Commission européenne aide les États membres](#) à garantir la résilience à différents niveaux:

- la [directive \(UE\) 2022/2557 sur la résilience des entités critiques](#) (directive CER) établit l'obligation de recenser les entités critiques dans différents secteurs, afin de renforcer leur résilience, en veillant à ce que les services qui sont essentiels au maintien de fonctions sociétales ou d'activités économiques vitales soient fournis sans entrave dans le marché intérieur.

Cette directive renforcera la résilience face à une série de menaces **pour faire en sorte que les entités critiques puissent prévenir les incidents perturbateurs, y résister, les absorber et s'en remettre**, que ces incidents résultent d'aléas naturels, d'attentats terroristes, de menaces internes ou d'actes de sabotage, ou encore d'urgences de santé publique telles que la récente pandémie de COVID-19. La directive CER reflète une réalité opérationnelle qui ne cesse de gagner en complexité et le changement de paradigme, de la «protection» à la «résilience», observé dans le monde universitaire, dans l'industrie et dans l'élaboration des politiques. Elle ne couvre pas les risques en matière de cybersécurité.

Face à un paysage des risques toujours plus complexe, la directive CER a un champ d'application sectoriel plus large qui permettra aux États membres et aux entités critiques de mieux faire face aux interdépendances et aux éventuels effets en cascade d'un incident. **Elle couvre onze secteurs**: énergie, transports, banques, infrastructures du marché financier, santé, eau potable, eaux usées, infrastructures numériques, administration publique, espace, et production, transformation et distribution de denrées alimentaires.

**Les services PNT et leur résilience présentent un intérêt pour bon nombre des secteurs** couverts par la directive, notamment pour les transports, l'énergie, les télécommunications et la finance, et il convient dès lors de les évaluer dans le cadre des **évaluations des risques** devant être réalisées par les entités critiques et dans celui des **mesures de renforcement de la résilience** mises en œuvre le cas échéant. Étant donné que la directive CER couvrira également les segments terrestres de l'infrastructure spatiale qui sont exploités par les États membres ou des opérateurs privés, elle renforcera aussi la résilience des entités qui fournissent des services PNT à d'autres secteurs de l'économie.

Enfin, la directive CER jette les bases d'une **coopération plus étroite au niveau de l'UE** et sert de point de référence également pour les activités législatives et réglementaires relatives aux infrastructures critiques en dehors de l'UE;

- la [directive \(UE\) 2022/2555](#) (directive SRI 2) établit des mesures destinées à assurer un niveau élevé commun de cybersécurité dans l'ensemble de l'UE pour les entités recensées en vertu de la directive CER. Elle renforcera le niveau global de la cybersécurité dans l'UE en encourageant une culture de la sécurité dans tous les secteurs et en garantissant la préparation et la coopération des États membres, par exemple, en exigeant la mise en place de centres de réponse aux incidents de sécurité informatique (CSIRT) et en créant un [groupe de coopération](#) pour soutenir et faciliter la coopération stratégique et l'échange d'informations entre les États membres;
- en octobre 2022, la Commission européenne a adopté une [proposition de recommandation du Conseil visant à renforcer la résilience des infrastructures critiques de l'UE](#). La priorité est accordée aux secteurs clés de l'énergie, des infrastructures numériques, des transports et de l'espace;
- le [règlement délégué \(UE\) 2022/30 de la Commission](#) impose des exigences de cybersécurité, de respect de la vie privée et de protection contre la fraude à certaines catégories d'équipements radioélectriques, notamment dans les infrastructures critiques, comme préalable à leur mise sur le marché de l'UE. L'évolution de cet acte juridique constituera la [loi sur la cyberrésilience](#).

### 3.4.2 Pacte vert pour l'Europe

L'Europe s'est engagée à relever le **défi mondial que constituent le changement climatique et la dégradation de l'environnement** et jouera un rôle déterminant dans la réparation des dommages, en protégeant, préservant et restaurant la biodiversité et les écosystèmes et en atténuant les effets du changement climatique induits par les pratiques humaines tout en soutenant le rétablissement de la planète. Cet engagement de l'Europe s'est manifesté au fil des ans par plusieurs accords, initiatives, politiques et réglementations. L'UE a adopté une stratégie de croissance durable qui change la donne, à savoir le [pacte vert pour l'Europe et les initiatives qui y sont associées](#), par laquelle elle vise à parvenir à la neutralité climatique d'ici à 2050 d'une manière juste et inclusive, en encourageant une économie à faible intensité de carbone et résiliente face au changement climatique. Le pacte vert pour l'Europe contribue à la réalisation de progrès vers une économie du bien-être qui rende à la planète davantage qu'elle ne lui prend, et à l'accélération de la transition vers une économie circulaire non toxique, où la croissance est régénérative et les ressources sont utilisées efficacement et de manière durable.

Le pacte vert pour l'Europe appelle à se doter des capacités, des outils et des services nécessaires pour surveiller les émissions anthropiques de carbone, mais aussi pour surveiller, analyser, prédire et atténuer les incidences des activités humaines sur la qualité du sol, de l'air et de l'eau. L'utilisation **des données d'observation de la Terre et des données météorologiques** pour compléter les données in situ (provenant, par exemple, de capteurs au sol, etc.) et d'autres données non satellitaires (par exemple, des données mobiles, des statistiques, etc.) offre une possibilité unique de surveiller à l'échelle mondiale, mais néanmoins avec un niveau suffisamment précis, l'état et les changements de l'environnement, pour éclairer les politiques et les mesures d'atténuation et d'adaptation encore à prendre.

L'occultation radio GNSS fournit des profils de vapeur d'eau in situ et est utilisée pour **améliorer les prévisions météorologiques**, et les observations fondées sur les GNSS permettent d'estimer les propriétés géodésiques de la Terre (champ magnétique, atmosphère) afin de faciliter la **modélisation climatique**. Les GNSS permettent également une détermination précise de l'orbite des satellites environnementaux en LEO qui surveillent le changement climatique terrestre.

Le programme spatial de l'UE est un pilier de la transformation vers une planète plus saine sur la base des données spatiales, grâce notamment aux **données PNT avancées** fournies par Galileo et EGNOS. Il génère des avantages environnementaux qui ont un effet positif sur les objectifs et les activités du pacte vert pour l'Europe. Par exemple:

- dans les **secteurs aéronautique et maritime**, les GNSS permettent de calculer des itinéraires efficaces, ce qui entraîne une **réduction** de la consommation de carburant et des **émissions de gaz à effet de serre** connexes (par exemple, les avions en approche survolent les aéroports moins longtemps dans l'attente d'une piste d'atterrissage disponible).

En outre, une surveillance précise de la position de l'aéronef, ainsi que des conditions météorologiques et de la présence de zones sursaturées en glace, réduirait la production **de traînées de condensation persistantes et des effets non liés au CO<sub>2</sub> qui y sont associés**;

- dans le **secteur agricole**, les GNSS permettent le pilotage automatique des machines agricoles et réduisent le tassement des sols, ce qui améliore la santé des sols et leur capacité à stocker le carbone;
- dans le **secteur ferroviaire**, les systèmes d'assistance aux conducteurs fondés sur les GNSS optimisent la conduite des trains et réduisent la consommation d'énergie de traction et, dès lors, les émissions de gaz à effet de serre;
- dans le **secteur routier**, les GNSS permettent des trajets plus courts et plus efficaces, ce qui entraîne une diminution du temps d'engagement du moteur automobile et, dès lors, une réduction de l'empreinte carbone de chaque trajet;
- dans le **secteur de la distribution d'énergie**, les GNSS permettent une datation et une synchronisation précises de l'infrastructure de transport d'énergie. Cet aspect est fondamental pour la prolifération des réseaux intelligents et pour le maintien d'une fréquence de tension précise, nécessaire en raison de l'utilisation accrue des énergies renouvelables pour la transition écologique;
- dans la **surveillance des infrastructures en mer** (par exemple, les éoliennes ou les plateformes pétrolières), les GNSS permettent une exploitation des drones plus efficace que ce qui est possible avec les moyens traditionnels, ce qui réduit considérablement les émissions de gaz à effet de serre.

### 3.4.3 Aviation avec équipage à bord

Le **PNT** (sur la base, notamment, des GNSS et de leurs systèmes de renforcement SBAS, ABAS et GBAS) **joue un rôle essentiel dans l'aviation** pour les systèmes et applications de communications, navigation et surveillance (CNS) qui soutiennent la gestion du trafic aérien (ATM), augmentent les capacités aéroportuaires et améliorent l'efficacité environnementale et économique (diminution des nuisances sonores, itinéraires plus efficaces, économies de carburant et réduction des émissions, par exemple) tout en garantissant la sécurité:

- en matière de **communications**, une **référence temporelle fiable**, telle que celle qui est fournie par les GNSS, est essentielle à des applications telles que la synchronisation des réseaux au sol et les communications contrôleur-pilote par liaison de données (CPDLC) permettant des communications de contrôle de la circulation aérienne (ATC) par liaison de données;
- en matière de **surveillance**, le système de surveillance complet, depuis les capteurs jusqu'à l'ATC, utilise une **seule référence temporelle**, ce qui garantit que les décisions d'ATC sont prises sur la base d'informations de surveillance fiables (en contrepartie, les GNSS deviennent la seule source d'erreur, de sorte que des services de synchronisation de substitution sont nécessaires). Les avantages du recours aux GNSS sont reconnus en ce que la surveillance dépendante automatique en mode diffusion (ADS-B) intègre des informations GNSS. Par exemple, le [mandat des États-Unis concernant l'ADS-B](#) exige de facto l'utilisation de SBAS pour garantir la faisabilité des opérations. Enfin, l'ADS-B exploitant le positionnement par GNSS peut permettre la rationalisation des infrastructures de représentation de l'espace d'état (SSR);
- en matière de **navigation**, les GNSS sont essentiels à la mise en œuvre de la navigation fondée sur les performances (PBN). Parmi les opérations de navigation, la fonction la plus critique assurée par la technologie SBAS est constituée des approches RNP jusqu'aux minima des performances d'alignement de piste avec guidage vertical (LPV), c'est-à-dire les **approches LPV** (des approches tridimensionnelles qui fournissent un guidage latéral et vertical semblable au guidage des approches ILS CAT I, mais sans infrastructure au sol de radionavigation in situ). Si les minima de l'opération d'approche sont inférieurs au plafond des nuages, l'opération est réalisable, **en réduisant le plus possible les perturbations** (c'est-à-dire les annulations, les retards ou les détournements vers d'autres aéroports) **et en améliorant la sécurité, l'efficacité et l'accessibilité**. Des minima allant jusqu'à 250 pieds et 200 pieds sont possibles, respectivement, sur les pistes d'approche classique et les pistes d'approche de précision et, dans les deux cas, il est possible de réaliser le segment d'approche finale du vol jusqu'à 100 pieds, voire d'atterrir sans contact visuel avec l'environnement de la piste, et ce sur la base d'un **recours combiné aux SBAS et au système de vision en vol améliorée (EFVS)** de l'aéronef, pour autant que l'EFVS à bord présente les caractéristiques appropriées et que l'autorité nationale compétente ait donné une approbation spéciale.

Il convient de signaler que les GNSS non seulement apportent une valeur ajoutée aux systèmes terrestres, mais qu'ils sont aussi largement utilisés par les applications et **systèmes embarqués** à bord de l'aéronef, en particulier à des fins de synchronisation.

D'autres avantages de l'utilisation des GNSS sont par ailleurs décrits dans le [rapport sur les besoins et les exigences des utilisateurs du secteur aéronautique](#): citons par exemple les [approches fondées sur le SBAS sur les pistes à vue](#) pour les environnements de l'aviation générale (en principe les petits aérodromes VFR), la [conduite d'aéronefs à voilure tournante](#) souvent dans des conditions non optimales pour les opérations de recherche et de sauvetage (SAR) ou les services médicaux d'urgence par hélicoptère ([SMUH](#)), l'[utilisation de l'altitude géométrique](#) sur la base du SBAS pour le développement de systèmes améliorés d'avertissement du sol, tels que le système amélioré d'avertissement de proximité du sol ([EGPWS](#)), par rapport au système classique d'avertissement et d'alarme d'impact ([TAWS](#)), et la surveillance des altitudes barométriques.

À l'avenir, l'inclusion des **solutions bifréquences et multiconstellations de Galileo et d'EGNOS** générera des **avantages supplémentaires** pour l'aviation, tels que de meilleures performances (amélioration de la disponibilité et de la continuité, par exemple), une zone de couverture SBAS plus vaste, des niveaux de protection moins stricts, c'est-à-dire des opérations plus avancées, des capacités de soutien aux opérations CAT III fondées sur les GBAS dans toutes les latitudes, une plus grande robustesse face aux RFI, l'atténuation des vulnérabilités ionosphériques ou le soutien à des applications futures telles que la navigation 4D grâce aux services de synchronisation des GNSS.

Il existe plusieurs grandes initiatives visant à faciliter l'utilisation des GNSS pour la gestion du trafic aérien européen. Le [plan directeur ATM européen définit la feuille de route pour l'utilisation d'EGNOS et de Galileo, en combinaison avec le système GPS, pour différentes phases de vol](#) (dans le cadre des systèmes CNS). Sa feuille de route pour les systèmes CNS comprend des étapes pour l'utilisation opérationnelle de systèmes renforçant les signaux GPS et Galileo: EGNOS V3 (SBAS bifréquences et multiconstellations), ARAIM et GBAS.

Le [règlement d'exécution \(UE\) 2018/1048 de la Commission](#) (règlement d'exécution sur la PBN) impose la mise en œuvre progressive des itinéraires et procédures d'approche de la **navigation fondée sur les performances** (PBN) afin d'améliorer la conception de l'espace aérien, favorisant ainsi une exploitation des aéronefs plus sûre, plus écologique et plus efficace, tout en améliorant le rapport coût-efficacité. Il exige qu'à partir de 2030, l'ensemble des itinéraires normalisés de départ aux instruments (SID) et des itinéraires normalisés d'arrivée aux instruments (STAR) reposent uniquement sur la PBN, avec un GNSS comme principal moyen de navigation, et fait du SBAS le principal moyen de navigation pour les opérations CAT I. En outre, il exige la **mise en œuvre de procédures d'approche fondées sur la PBN, y compris les procédures EGNOS** (procédures LPV), pour tous les bouts de piste aux instruments (IRE) en Europe d'ici à 2020 (IRES sans approche de précision) et à 2024 (IRES avec approche de précision).

En outre, et dans le but de permettre la **rationalisation de l'infrastructure de navigation conventionnelle** ainsi que d'assurer un niveau minimal de service avec un niveau de sécurité acceptable en cas d'urgence (par exemple, en cas d'indisponibilité des GNSS), le règlement d'exécution sur la PBN exclut expressément l'utilisation des procédures de navigation conventionnelles à compter du 6 juin 2030, sauf en cas d'urgence liée à la PBN, c'est-à-dire lorsque, pour des raisons imprévues indépendantes de la volonté des prestataires de services ATM/ANS, le GNSS ou les autres méthodes utilisées pour la navigation fondée sur les performances ne sont plus disponibles. Dans ces cas exceptionnels, le règlement d'exécution sur la PBN demande la conservation d'un réseau minimal opérationnel (MON) d'aides à la navigation conventionnelles (ILS, VOR ou DME, par exemple) afin de faire en sorte que les services de navigation puissent toujours être fournis sans compromettre la sûreté et la sécurité en cas d'urgence.

**Par conséquent, à compter du 6 juin 2030, le GNSS sera le moyen de navigation à utiliser en principe dans l'espace aérien européen pour toutes les phases de vol jusqu'à l'opération CAT I incluse, complété par les GBAS et des systèmes d'atterrissage permettant des opérations ILS CAT II ou CAT III, le cas échéant [\[Transition to performance-based navigation \(PBN\)\]](#).**

En plus d'adopter des mesures réglementaires telles que le règlement d'exécution sur la PBN, l'Union européenne facilite l'adoption du PNT et des GNSS européens dans le secteur aéronautique:

- **en soutenant, notamment par des financements, la mise en œuvre et le respect du règlement d'exécution sur la PBN** au moyen de différentes mesures destinées à faciliter à la fois l'installation de récepteurs GNSS dans les aéronefs de la flotte européenne et la mise en œuvre, par les prestataires de services de navigation aérienne, des procédures fondées sur les GNSS;
- **en élargissant l'utilisation des GNSS européens** aux aéronefs à voilure tournante et aux approches fondées sur le SBAS sur les pistes à vue, et en mettant au point des [outils soutenant la mise en œuvre d'EGNOS](#);
- **en finançant des programmes** de R&D liés aux applications GNSS, tels que le projet SESAR;
- en œuvrant à l'inclusion des **solutions bifréquences et multiconstellations de Galileo et d'EGNOS** dans les **normes** relatives aux signaux dans l'espace dans l'aviation de l'OACI, annexe 10, volume I, et dans les normes EUROCAE applicables aux récepteurs (pour les systèmes de renforcement SBAS, ARAIM et GBAS).

En outre, des activités sont menées en Europe (par exemple, au niveau de SESAR, de l'EUROCAE et d'Eurocontrol) pour définir des **technologies PNT complémentaires** à même de **fournir un PNT sûr et résilient**, de proposer des **solutions de repli efficaces en cas de perturbation des GNSS** et d'assurer ainsi la continuité des opérations. À court terme, les efforts seront axés sur l'amélioration des infrastructures et services de mesure de distance (DME), ce qui soutiendra probablement la norme RNP-1. À long terme, une combinaison adéquate de systèmes PNT complémentaires devrait garantir l'efficacité du PNT, en protégeant contre les menaces liées à la sûreté et à la sécurité du PNT, tout en optimisant l'utilisation du spectre radioélectrique par ces systèmes, conformément à la [résolution A41-8C de l'Assemblée de l'OACI](#).

### 3.4.4 Aviation sans équipage à bord

Le marché des systèmes d'aéronefs sans équipage à bord (UAS ou drones) a connu une croissance rapide ces dernières années. L'OACI a mis en place le [panel des systèmes d'aéronefs télépilotes \(RPASP\)](#) pour élaborer les **normes requises pour les vols internationaux**, et le [groupe consultatif sur les systèmes d'aéronefs sans équipage à bord \(UAS-AG\)](#) pour conseiller le secrétariat de l'OACI dans l'élaboration des documents d'orientation. L'OACI est aussi en train de créer un [groupe d'étude sur la mobilité aérienne avancée](#) afin de fournir des orientations similaires pour soutenir le développement de la mobilité aérienne avancée et urbaine. Le PNT sera un facilitateur essentiel pour bon nombre d'applications liées à l'aviation sans équipage à bord, comme dans le cas de l'aviation avec équipage à bord et du soutien qu'il fournit, par exemple, aux applications CNS.

En Europe, le [règlement \(UE\) 2018/1139](#) (*règlement de base de l'AESA*) a élargi les compétences de l'AESA à tous les aéronefs sans équipage à bord, indépendamment de leur poids et de leurs dimensions, et a introduit une approche fondée sur les risques et axée sur les opérations pour la réglementation de sécurité dans le secteur de l'aviation, et notamment des drones. Le [règlement d'exécution \(UE\) 2019/947](#) et le [règlement délégué \(UE\) 2019/945](#) adoptés par la suite établissent le [cadre pour l'exploitation en toute sécurité des drones civils dans le ciel européen](#), en distinguant trois catégories d'exploitations d'UAS en fonction du risque opérationnel associé: la catégorie «**ouverte**» (pour les opérations à risque faible), la catégorie «**spécifique**» (pour les opérations à risque moyen) et la catégorie «**certifiée**» (pour les opérations à risque élevé, y compris le transport de personnes ou de marchandises dangereuses).

Pour la [catégorie «certifiée»](#), les aéronefs sans équipage à bord (certifiés) qui volent selon les règles de navigation aux instruments seront soumis aux mêmes exigences en matière d'utilisation de l'espace aérien et aux mêmes procédures d'exploitation que les aéronefs avec équipage à bord, la révision de ces exigences et procédures étant en cours pour garantir que toutes les particularités des drones sont correctement couvertes. Une grande partie de la section [3.4.3](#) précédente concernant l'aviation avec équipage à bord s'appliquerait donc également à ces aéronefs sans équipage à bord pour ce qui est du PNT. Il s'agit de la catégorie dont les performances en matière de PVT sont les plus exigeantes, en particulier pour l'exploitation au-delà de la portée optique (BVLOS).

En revanche, les drones des [catégories «ouverte» et «spécifique»](#) ne sont actuellement pas soumis à des exigences spécifiques en matière de performances de navigation. Il incombe à l'exploitant d'UAS de veiller à ce que les services fournis en externe qui sont nécessaires à la sécurité des exploitations d'UAS, tels que les services GNSS, atteignent un niveau de performance adéquat pour l'exploitation et soient maintenus pendant toute la durée de celle-ci. Toutefois, dans la [catégorie «spécifique»](#), le demandeur doit définir la zone à risque pour l'exploitation, soit le volume d'exploitation, constitué de la géographie de vol et du volume de secours. **Pour déterminer le volume d'exploitation, le demandeur doit tenir compte des capacités de maintien de la position de l'UAS dans l'espace 4D (latitude, longitude, hauteur et temps)** et, par conséquent, la précision de la solution de navigation devrait être prise en considération et intégrée dans cette détermination et, **en fonction de l'exploitation (niveau SAIL), l'intégrité peut également jouer un rôle essentiel pour garantir la fiabilité de la solution PNT fondée sur les GNSS pour l'exploitation prévue en tant qu'entrée dans le système de navigation du drone.**

À cet égard, la Commission européenne et l'AESA ont pris des mesures importantes pour continuer à soutenir le secteur des drones en publiant des réglementations claires jetant les bases d'exploitations innovantes aujourd'hui et à l'avenir. Le premier cadre réglementaire pour l'[U-space](#) [les règlements d'exécution [\(UE\) 2021/664](#), [\(UE\) 2021/665](#) et [\(UE\) 2021/666](#) de la Commission] établit des dispositions pour les exploitants d'UAS, les prestataires de services U-space (USSP), les prestataires de services d'informations communes et les prestataires de services de la navigation aérienne concernés, en établissant certains services U-space obligatoires à fournir chaque fois qu'un espace aérien U-space est désigné. Il incombe aux États membres de déterminer les exigences en matière de performance dans un espace aérien U-space désigné, sur la base d'une évaluation des risques dans l'espace aérien menée avant la désignation U-space.

À l'heure actuelle, il n'existe pas d'exigences harmonisées en matière d'utilisation de l'espace aérien U-space au niveau des capacités et des performances de navigation, mais il est envisagé que **les GNSS puissent jouer un**



**rôle dans l'amélioration des services U-space**, étant donné que des services tels que l'identification du réseau, la géovigilance, l'autorisation de vol et l'information sur la circulation peuvent bénéficier de l'utilisation des GNSS, notamment pour soutenir la mise en œuvre du [concept de mobilité aérienne urbaine \(UAM\)](#).

Bien que les GNSS soutiennent déjà les exploitations d'UAS et contribuent aux services U-space et à la mobilité aérienne urbaine, la Commission européenne s'emploie à faciliter davantage l'utilisation des services des GNSS européens pour les exploitations de drones, conformément à une **feuille de route interne pour l'utilisation des services des GNSS européens pour les drones**, qui soutiendra le marché émergent des drones par le développement de services adéquats des GNSS européens. Tout d'abord, la feuille de route envisage l'attribution suivante des services des GNSS européens pour les exploitations de drones:

| EGNSS SERVICES<br>UAS OPS CATEGORIES |   | GALILEO* |     |       |  | EGNOS** |     | *Alone or in combination with GPS<br>**With GPS<br>***Support to EGNOS V3 and ARAIM |
|--------------------------------------|---|----------|-----|-------|--|---------|-----|---|
|                                      |   | OS       | HAS | OSNMA | Support to SoL Applications <sup>†</sup> | OS      | SOL |   |
| OPEN                                 |   | ✓        | ✓   | ✓     |  | ✓       |     | Low Risk  |
| SPECIFIC                             | L | ✓        | ✓   | ✓     |  | ✓       |     |   |
|                                      | M | ✓        | ✓   | ✓     |  |         | ✓   | Medium Risk   |
|                                      | H |          |     |       | ✓  |         | ✓   | High Risk   |
| CERTIFIED                            |   |          |     |       | ✓  |         | ✓   |   |

Illustration 18 — Attribution des services des GNSS européens aux catégories d'exploitations de drones

Étant donné que les exploitations d'UAS englobent un très large éventail de cas d'utilisation et d'environnements opérationnels, il y a lieu de suivre une méthode par étapes traitant d'abord les opérations à risque faible (qui ont presque atteint aujourd'hui un niveau acceptable de maturité), puis les opérations à risque moyen (aux exigences importantes mais en plein essor grâce au meilleur soutien sur le plan de la réglementation et de la normalisation) et, enfin, les opérations à risque élevé (qui soutiennent les applications futures les plus exigeantes, telles que les taxis aériens dans le cadre du concept de mobilité aérienne urbaine):

- pour les opérations à risque faible, les informations sur les GNSS européens et le soutien aux utilisateurs d'UAS (au moyen de sites web ou d'un centre d'assistance, par exemple) seront améliorés;
- pour les opérations à risque moyen, un modèle de fourniture de services à partir des GNSS européens, fondé sur les services des GNSS européens existants ou prévus, incluant également, le cas échéant, des engagements spécifiques dans le document définissant le service, et un concept opérationnel/d'intégrité pour la navigation fondée sur les GNSS européens seront élaborés;
- pour les opérations à risque élevé, des services des GNSS européens couvrant spécifiquement les drones seront créés, en vue d'une déclaration d'engagements spécifiques dans le document définissant le service.

Parallèlement, un soutien à la normalisation des GNSS européens sera fourni, principalement par l'intermédiaire de l'EUROCAE, qui propose déjà une série de documents d'appui élaborés par son groupe de travail 105. En particulier, les initiatives GNSS suivantes sont en cours:

- les **lignes directrices ED-301 relatives à l'utilisation de solutions multi-GNSS pour la catégorie «spécifique» des UAS — Opérations à risque faible SAIL I et SAIL II**, publiées en 2022, qui couvrent des aspects spécifiques de l'utilisation des GNSS pour les opérations à risque faible;
- l'élaboration des **lignes directrices relatives à l'utilisation de solutions multi-GNSS pour les UAS — Risque moyen**, qui visent à étendre l'utilisation des GNSS par les exploitants d'UAS dans le cadre de la catégorie «spécifique» aux opérations à risque moyen et dont la publication est prévue en 2024.

Enfin, la Commission européenne finance un certain nombre de projets dans le cadre des programmes [Horizon 2020](#) et [Horizon Europe](#) afin d'étudier les performances de navigation des exploitations d'aéronefs sans équipage à bord (par exemple, [REALITY](#) ou [EGNSS4RPAS](#)), apportant ainsi des contributions précieuses aux initiatives de normalisation et de réglementation.



### 3.4.5 Navigation maritime et intérieure

L'[OMI \(Organisation maritime internationale\)](#) définit les paramètres de base de la qualité de navigation requise pour les systèmes mondiaux de radionavigation (WWRNS) dans sa [résolution A.1046\(27\)](#). L'[IALA \(Association internationale de signalisation maritime\)](#) définit les normes, recommandations et documents d'orientation appropriés pour les autorités maritimes en tenant compte des exigences établies et des réglementations maritimes mentionnées dans la convention de l'OMI pour la sauvegarde de la vie humaine en mer (SOLAS). Le secteur maritime étant une industrie mondiale, ces normes, recommandations et orientations sont essentielles. [Galileo est reconnu comme une composante des WWRNS depuis 2016](#), tandis que l'OMI a déclaré en juin 2017 que les **SBAS** ne relèvent pas du champ d'application de sa résolution A.1046(27) et ne sont donc pas soumis à une obligation de reconnaissance par l'OMI pour leur utilisation à des fins de navigation en mer.

La [résolution A.915\(22\) de l'OMI](#) dresse une **liste d'applications maritimes**, réglementées ou non, **nécessitant la connaissance de la position ou de la vitesse du bâtiment pour la navigation générale ou tout autre usage**. Cette résolution, qui pourrait nécessiter une mise à jour à l'avenir, est la référence convenue au niveau international qui résume les besoins de positionnement des utilisateurs du secteur maritime; en particulier, **l'OMI définit les exigences maritimes applicables aux GNSS**, en établissant des exigences générales, des exigences opérationnelles, des exigences institutionnelles et des exigences transitoires.

Le transport par voie d'eau s'effectue dans différents environnements ou en différentes phases de navigation:

- **navigation hauturière:** au-delà du plateau continental et à plus de 50 milles marins des terres;
- **navigation côtière:** au-dessus du plateau continental ou à moins de 50 milles marins des côtes;
- **approches et entrées portuaires, et voies navigables intérieures:** en principe dans des eaux restreintes, où les navires doivent naviguer à travers des canaux bien définis.

Les exigences en matière de navigation par voie d'eau pour la navigation en général dépendent de la phase de navigation (de plus amples informations sont disponibles dans le [rapport de l'EUSPA sur les besoins des utilisateurs du secteur de la navigation maritime et intérieure](#)).

En 2006, l'OMI a commencé à élaborer, au sein du comité de la sécurité maritime (MSC), le [concept de navigation électronique](#) comme étant «la collecte, l'intégration, l'échange, la présentation et l'analyse harmonisés de renseignements maritimes à bord et à terre par voie électronique dans le but d'améliorer la navigation quai à quai et les services connexes, la sécurité et la sûreté en mer et la protection du milieu marin». Ce concept repose sur des services PNT solides offrant une redondance suffisante. Un PNT résilient est l'un des sept piliers de l'architecture de navigation électronique de l'OMI. Le concept de navigation électronique devrait permettre de diffuser l'utilisation des récepteurs GNSS multiconstellations et garantir la résilience à l'aide de systèmes de substitution.

En ce qui concerne la [navigation maritime](#), l'annexe III de la [directive 2002/59/CE](#) (telle que modifiée) met en place un système communautaire de suivi du trafic des navires et d'information, dans le cadre duquel la **collecte des données** du système d'identification automatique (**AIS**) **par satellite** est l'une des interfaces du système central SafeSeaNet, **ces données, y compris des informations telles que la position du navire, alimentant donc les messages électroniques**. Il s'agit d'un élément important pour le suivi du trafic des navires qui contribue à renforcer la sécurité et l'efficacité du trafic maritime.

En ce qui concerne la [sécurité](#), l'OMI a publié des [directives de haut niveau sur la gestion des cyber-risques maritimes](#) (MSC-FAL.1/Circ.3), que viennent compléter d'autres recommandations des associations maritimes, de l'Association internationale des sociétés de classification (IACS) et de l'Association internationale des ports (IAPH). Les [lignes directrices sur la cybersécurité à bord des navires](#) fournies par les associations maritimes soulignent que *les cyberincidents peuvent résulter de la perte ou de la manipulation de données de capteurs externes, critiques pour l'exploitation d'un navire. Cela inclut, entre autres, les systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS) [...] Un cyberincident peut s'étendre au déni ou à la manipulation de service et, par conséquent, peut affecter tous les systèmes associés à la navigation. L'authentification et l'intégrité de la précision de la position du navire sont nécessaires* pour alerter le pont d'une situation de risque.

Les programmes relatifs aux GNSS européens portent sur différentes initiatives visant à fournir des informations supplémentaires en matière d'intégrité et d'authentification aux utilisateurs du secteur maritime (voir section [3.3.2.2](#) pour les différentes phases):

- l'**utilisation des corrections d'EGNOS** au format RTCM au moyen de balises radio moyenne fréquence et du message 17 AIS VDL est déjà activée et les [directives G1129 de l'IALA](#) expliquent comment mettre en œuvre cette retransmission;
- en ce qui concerne l'**intégrité**, la mise au point d'un premier **service maritime EGNOS à utiliser avec le RAIM** permettra un positionnement plus précis, y compris la transmission d'alertes au pont. Les [directives G1152 de l'IALA](#) fournissent aux autorités maritimes côtières des informations sur l'utilisation des SBAS dans le secteur maritime. Une nouvelle norme d'essai pour les récepteurs embarqués à bord d'un navire est en cours d'élaboration au sein de la CEI pour les récepteurs SBAS ([norme CEI 61108-7](#)) et devrait être publiée en 2023;
- en ce qui concerne l'**authentification**, deux projets financés au titre des éléments fondamentaux [GSA/GRANT/02/2019](#) mettent en œuvre le service d'authentification des messages de navigation en libre service de Galileo (OSNMA) pour les récepteurs embarqués à bord d'un navire.

Pour ce qui est de ces initiatives, il est nécessaire de **mettre à jour certaines normes et réglementations**:

- la [résolution MSC.233\(82\) de l'OMI relative à l'adoption des normes de performance pour les équipements de réception Galileo embarqués](#): le sous-comité de la navigation, des communications et de la recherche et du sauvetage (NCSR) de l'OMI examine actuellement une nouvelle approche pour simplifier ces normes de performance. La [norme CEI 61108-3 concernant les matériels et systèmes de navigation et de radiocommunication maritimes](#) inclura dans sa version actualisée, en principe en 2023, des recommandations spécifiques pour les équipements de réception Galileo embarqués;
- une nouvelle activité sera demandée au sein de l'OMI pour l'élaboration de normes de performance pour des **solutions bifréquences et multiconstellations associant SBAS et ARAIM**. Ces travaux pourraient être achevés en 2025 et, par conséquent, une nouvelle norme d'essai CEI en la matière devrait être élaborée, l'objectif étant ensuite sa finalisation dans un délai de deux ans;
- le [règlement d'exécution \(UE\) 2022/1157 de la Commission relatif aux exigences de conception, de construction et de performance et aux normes d'essai applicables aux équipements marins](#): il faudrait y inclure de nouvelles normes de performance et d'essai pour les récepteurs embarqués et actualiser les normes existantes, tant pour Galileo que pour les solutions bifréquences et multiconstellations associant SBAS et ARAIM, et ce lors de la prochaine mise à jour annuelle, une fois que ces normes seront disponibles.

En ce qui concerne la résilience des services PNT, l'Association internationale de signalisation maritime (IALA), qui peut compter sur des contributions essentielles de plusieurs États membres, travaille sur un **système de repli pour les zones côtières et portuaires appelé «R-MODE»** (ou «Ranging Mode») utilisant les signaux provenant des stations de balises radio moyenne fréquence et des stations AIS/VDES (AIS: système d'identification automatique; VDES: système d'échange de données en ondes métriques). Le projet [R-MODE Baltic2](#), cofinancé par l'Union européenne dans le cadre de l'initiative Interreg pour la région de la mer Baltique, a mis en place un banc d'essai en mer Baltique (de plus amples informations sur le R-MODE sont disponibles à l'annexe A, section 5.3.5). Les [directives G1158 de l'IALA](#) expliquent que **la synchronisation fondée sur les GNSS peut être utilisée** au niveau des côtes comme l'une des sources de synchronisation pour les signaux VDES requis **pour le R-MODE**. Cela nécessite de garantir que le signal GNSS, tel qu'il a été reçu par les stations, n'est pas affecté par un leurrage (par exemple, en utilisant des signaux GNSS cryptés et en vérifiant l'intégrité des signaux GNSS dans les stations).

[La recherche et l'innovation financées par l'UE dans le domaine de la sécurité maritime civile](#) ont également tiré parti des services PNT et GNSS pour renforcer les capacités de sécurité en mer des biens et des personnes face aux menaces naturelles ou internationales, ainsi que les capacités des garde-côtes et des missions civiles de la marine.

La **navigation intérieure nécessite une précision de positionnement, y compris sur le plan vertical**, pour calculer la hauteur de dégagement des ponts, des écluses, etc., et pour surveiller la situation du trafic. Afin d'améliorer les performances des GNSS, des stations GPS différentiel de l'IALA ont été mises en place pour, dans une certaine mesure, couvrir également les voies navigables intérieures. En outre, la distribution des données du système GPS différentiel au moyen du message 17 AIS se fait, dans de nombreuses zones, à l'aide des stations de base AIS Intérieur, qui sont accessibles aux navires équipés d'un transpondeur AIS Intérieur (lequel est compatible avec le transpondeur AIS Maritime).

Par rapport à la navigation maritime, la navigation intérieure est confrontée à davantage de **difficultés liées au blocage des signaux satellitaires** (ombres portées des reliefs, montagnes ou obstacles constitués d'ouvrages du génie civil tels que les ponts et les écluses). Malheureusement, dans les endroits où la précision de positionnement la plus élevée est requise, un blocage des signaux GNSS est également possible (par exemple, lorsqu'un navire entre dans une écluse). Du point de vue de l'intégrité, de la précision et de la fiabilité, la **navigation multiconstellation** serait dès lors avantageuse pour les utilisateurs du secteur de la navigation intérieure, car ils auraient ainsi accès à davantage de satellites.

Ces utilisateurs pourraient bénéficier du **service haute précision** de Galileo et des futurs **services d'EGNOS** prévus spécifiquement pour une utilisation dans le secteur maritime, pour autant que les équipements de positionnement à bord des bateaux de navigation intérieure soient installés correctement. Toutefois, des niveaux plus élevés de navigation intérieure automatisée nécessiteront des **capteurs de champ proche supplémentaires**, tels que des capteurs lidar et radar, en plus des capteurs GNSS. Un **traitement multi-antennes** pourrait aussi être utilisé pour accroître la robustesse et la sécurité de la navigation.

La [directive 2005/44/CE relative à des services d'information fluviale \(SIF\) harmonisés sur les voies navigables \(directive SIF\)](#) contient une recommandation relative à l'usage des technologies de positionnement par satellite. Le [règlement d'exécution \(UE\) 2019/838 de la Commission concernant les spécifications techniques applicables aux systèmes de suivi et de localisation des bateaux](#) contient des **exigences et spécifications techniques détaillées** pour les systèmes de suivi et de localisation des bateaux, conformes aux dispositions de la directive SIF et respectant les principes suivants:

- définition des exigences relatives aux systèmes et aux messages standard ainsi que des procédures permettant de les délivrer de façon automatisée;
- distinction entre systèmes qui répondent aux exigences concernant les informations tactiques sur le trafic et systèmes qui répondent aux exigences concernant les informations stratégiques sur le trafic en fonction tant de la précision du positionnement que de la fréquence de mise à jour requise;
- description des dispositifs techniques pertinents en matière de repérage et de suivi des navires, comme le SAI intérieur (système automatique d'identification intérieur);
- compatibilité des formats de données avec le système SAI maritime.

La directive 2005/44/CE (directive SIF) est en cours de révision en vue d'une adoption en 2023. Cette révision tiendra compte des travaux du Comité européen pour l'élaboration de standards dans le domaine de la navigation intérieure (CESNI), qui a adopté la première série de normes sur les SIF en avril 2021 ([standard européen pour les services d'information fluviale, ES-RIS 2021/1](#)). Ce standard reproduit les spécifications techniques actuellement applicables des règlements d'exécution de l'UE adoptés au titre de la directive SIF. Les évolutions futures des spécifications techniques, y compris celles qui concernent les systèmes de suivi et de localisation des bateaux, seront couvertes par les révisions bisannuelles du standard ES-RIS et entreront en vigueur par voie d'actes de droit dérivé adoptés en vertu de la directive SIF révisée. **Des dispositions spécifiques en matière de PNT et de GNSS pourraient également être couvertes à l'avenir par le standard ES-RIS.**

En outre, le [standard d'essai pour les appareils AIS Intérieur à bord](#) impose toutes les normes CEI de la série 61108 au récepteur GNSS interne. Galileo fait aujourd'hui partie de ces normes (partie 3) et l'utilisation d'EGNOS sera permise une fois que la partie 7 aura été publiée (à la mi-2023 normalement). L'utilisation des corrections d'EGNOS transmises au format RTCM au moyen du message 17 VDL est déjà activée.

Enfin, la navigation intérieure évolue et bénéficie de technologies émergentes propices à la sécurisation, à la numérisation et à la durabilité de ce secteur. L'exploitation autonome des navires créera de nouveaux débouchés commerciaux (y compris pour la navigation maritime), ainsi que de nouveaux défis, en soutenant les efforts de l'UE en matière de numérisation et de durabilité. La Commission européenne entend lancer en 2023 une **action préparatoire sur les données spatiales de l'UE pour des navires autonomes sur les voies navigables intérieures**, d'une durée de trois ans, afin d'évaluer la mesure dans laquelle les données spatiales de l'UE provenant de Galileo, d'EGNOS et de Copernicus peuvent être des facteurs clés de cette transformation, en contribuant à des informations de positionnement fiables et solides et à une cartographie harmonisée des chenaux et de l'environnement, nécessaires à une exploitation autonome sûre et écologique.

### 3.4.6 Transport routier

Le **succès du positionnement par satellite dans les plateformes d'applications et appareils de navigation portables des véhicules**, rendu possible grâce à la précision des services de positionnement et de navigation avancée fournis par les satellites, a été récemment renforcé par l'apparition d'applications de navigation et de cartes faciles d'utilisation sur les téléphones intelligents, ainsi qu'il ressort du [rapport de l'EUSPA sur les besoins des utilisateurs du secteur routier](#).

La **prépondérance des applications routières fondées sur les GNSS** sur le marché est confirmée par les décisions des pouvoirs publics et l'avènement des voitures connectées, qui, si l'on y ajoute la communication à courte portée permanente entre les véhicules et avec les autres usagers de la route et les infrastructures (communication de véhicule à tout, ou V2X), peuvent déboucher sur une série presque illimitée d'applications améliorant à la fois la sécurité routière et l'efficacité de la circulation. En outre, les GNSS associés à d'autres capteurs embarqués et à la cartographie en 3D joueront un rôle clé dans les **véhicules autonomes** en raison des exigences de performance très strictes en matière de précision du positionnement, de disponibilité et de robustesse.

Le **tachygraphe intelligent**, introduit par le [règlement \(UE\) n° 165/2014](#), est une évolution du tachygraphe numérique, qui comprend notamment une connexion à un récepteur GNSS, un dispositif de communication de détection précoce à distance et une interface avec les systèmes de transport intelligents. L'utilisation de tachygraphes connectés à un **GNSS** est un moyen **approprié et économiquement avantageux** d'enregistrer automatiquement la position d'un véhicule à certains points de la période de travail journalière, de manière à assister les agents de contrôle routier dans leur tâche. Les **spécifications techniques** du tachygraphe intelligent ont été définies dans le [règlement d'exécution \(UE\) 2016/799 de la Commission](#), et les tachygraphes intelligents sont installés dans les véhicules nouvellement immatriculés depuis 2019.

Les spécifications techniques ont été mises à jour dans le [règlement d'exécution \(UE\) 2021/1228 de la Commission](#), de manière à couvrir l'enregistrement des positions de départ et de fin des jours de travail des conducteurs de véhicules utilitaires, ainsi que les franchissements des frontières et les opérations de chargement et de déchargement. Les GNSS et le géopérage des franchissements des frontières permettent aux autorités de contrôle de contrôler plus efficacement les opérations de transport international des entreprises routières au regard des règles de marché et des règles sociales de l'UE. Cette **deuxième version** du tachygraphe intelligent devrait également **utiliser le service d'authentification des messages de navigation en libre service de Galileo (OSNMA)**, une fois qu'il aura été déclaré opérationnel. Ce tachygraphe commencera à être déployé dans les véhicules nouvellement immatriculés en août 2023. Tous les véhicules effectuant des opérations de transport international et relevant du champ d'application du règlement (UE) n° 165/2014 seront équipés d'une deuxième version du tachygraphe intelligent d'ici à août 2025 au plus tard.

En ce qui concerne le **télépéage, l'utilisation des GNSS pour la tarification routière**, qui consiste à facturer un utilisateur (c'est-à-dire un véhicule) sur la base de sa position déclarée, est régie par la [directive \(UE\) 2019/520 concernant l'interopérabilité des systèmes de télépéage routier](#). Cette directive autorise le **péage par satellite** pour les véhicules utilitaires lourds ou légers, rendant possible la suppression des stations de péage physiques sur les autoroutes, éliminant les files d'attente et permettant à l'utilisateur final de gagner du temps, tout en garantissant la protection de la vie privée des utilisateurs grâce à l'anonymisation des données. À partir d'octobre 2021, tous les nouveaux systèmes de télépéage mis en service qui utilisent le positionnement par satellite sont compatibles avec EGNOS et Galileo. En outre, à compter de 2028, tous les nouveaux systèmes de télépéage pour les voitures particulières devront être compatibles avec les GNSS.

Pour ce qui est des **systèmes de transport intelligents (STI)**, la [directive 2010/40/UE concernant le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents dans le domaine du transport routier](#) dispose que, en ce qui concerne les applications et services STI pour lesquels des services de datation et de positionnement précis et garantis sont nécessaires, il convient d'utiliser des infrastructures satellitaires ou toute technologie offrant un niveau de précision équivalent, telles que celles prévues par EGNOS et Galileo. Plusieurs règlements délégués adoptés dans ce cadre, notamment le [règlement délégué \(UE\) 2015/962 de la Commission concernant la mise à disposition, dans l'ensemble de l'Union, de services d'informations en temps réel sur la circulation](#), organisent l'accessibilité et l'échange des données générées grâce à un positionnement précis.

La [proposition de la Commission COM\(2021\) 813 relative à la révision de la directive 2010/40/UE](#) propose de garantir la compatibilité des applications et services STI dépendant des services de datation et de positionnement avec à tout le moins les services de navigation fournis par EGNOS et Galileo, y compris OSNMA.

En 2020, deux **normes pertinentes en matière de PNT** ont été publiées: pour les [communications STI sécurisées \(CEN/ISO TS 21176\)](#) et pour les usagers de la route vulnérables ([ETSI TS 103 300-1](#), [ETSI TS 103 300-2](#) et [ETSI TS 103 300-3](#)). [DATEX II](#) est la norme d'échange de données pour les stations STI qui échangent des informations sur le trafic entre les autorités publiques et les exploitants de services: incidents de circulation, travaux routiers, etc. Depuis 2021, DATEX II v.3.2 comprend un modèle de données de localisation nécessitant l'enregistrement de l'authentification GNSS.

En ce qui concerne le système **eCall**, le [règlement \(UE\) 2015/758](#) établit les exigences en matière de réception par type pour le déploiement du système eCall embarqué fondé sur le service 112. La fourniture d'informations de positionnement précises et fiables est un élément essentiel du bon fonctionnement du système eCall embarqué fondé sur le numéro 112. Conformément à ce règlement, les constructeurs de systèmes eCall veillent à ce que les **détecteurs** des systèmes eCall embarqués fondés sur le numéro 112 soient **compatibles** avec les services de positionnement fournis par les systèmes **Galileo et EGNOS**. Le [règlement délégué \(UE\) 2017/79 de la Commission](#) précise les méthodes d'essai et les exigences de performances pour la réception par type des GNSS.

En 2018 est entré en vigueur le [règlement de l'ONU n° 144](#), qui établit un mécanisme harmonisé de réception par type des systèmes, appareils ou composants eCall valables dans plus de 50 pays, dont le Japon, la Corée et la Russie. La compatibilité avec les systèmes GPS, GLONASS et Galileo ainsi que tous les SBAS existants est requise.

En 2021, la Commission européenne a lancé les travaux de mise à jour des spécifications eCall actuelles, tant pour les véhicules que pour les centres de réception des appels d'urgence, afin d'adapter le cadre juridique en vigueur à l'évolution des réseaux de télécommunications vers les réseaux à commutation de paquets.

En ce qui concerne les **systèmes de sécurité automobile**, et dans le cadre du nouveau [règlement \(UE\) 2019/2144 relatif à la sécurité générale](#) des véhicules automobiles, le [règlement délégué \(UE\) 2021/1958 de la Commission](#) concernant les systèmes d'adaptation intelligente de la vitesse (ISA) combinant un système de caméras, le GNSS et des cartes numériques exige que, lorsqu'un tel système fonctionne avec des capacités de positionnement, il soit **compatible au moins avec Galileo et EGNOS**.

En 2021 est entré en vigueur le [règlement de l'ONU n° 155](#), qui établit des prescriptions uniformes concernant la gestion de la cybersécurité dans les véhicules autonomes. Le leurrage des GNSS est considéré comme une menace et l'utilisation de messages authentifiés en tant que mesure d'atténuation est nécessaire.

La norme [CEN/CENELEC EN 16803](#) établit les procédures et méthodes d'essai GNSS pour l'établissement et l'évaluation des performances dans des applications routières très exigeantes (véhicules autonomes, par exemple). La publication d'une norme ISO compatible est encore nécessaire.

Enfin, au cours des prochaines années, la **numérisation des pratiques de contrôle** pourrait offrir davantage de possibilités d'utilisation des GNSS européens et conduire à des contrôles plus efficaces des véhicules et des conducteurs. En effet, l'application des règles dans le secteur du transport routier est essentielle pour garantir la sécurité routière et le bon fonctionnement du marché, qu'il s'agisse des temps de conduite et de repos, du poids et des dimensions des véhicules, du détachement des conducteurs, de la possession des autorisations de transport, des licences et des permis et du respect des conditions y afférentes, etc. Par exemple, des informations de localisation précises et fiables pourraient contribuer à la gestion des marchandises prioritaires en combinaison avec les informations électroniques relatives au transport de marchandises (eFTI) lors des contrôles douaniers et aux frontières.

Dans le secteur routier, les **normes** suivantes faciliteraient l'introduction des services des GNSS européens:

- une [norme 3GPP](#) actualisée pour la diffusion bifréquence et multiconstellation des signaux GNSS par l'intermédiaire du réseau mobile;
- une [norme d'essai associant GNSS et HAS](#) dans le cadre du comité spécial 134 de la RTCM.



### 3.4.7 Transport ferroviaire

La **stratégie européenne pour le transport ferroviaire** vise à rendre le réseau ferroviaire ouvert et interopérable, ce qui inclut le remplacement des systèmes nationaux de contrôle des trains par le [système européen de gestion du trafic ferroviaire/système européen de contrôle des trains \(ERTMS/ETCS\)](#), un système normalisé conçu spécifiquement pour répondre aux besoins du secteur ferroviaire en Europe. Ce système sous sa forme actuelle n'utilise pas les GNSS, étant donné que son architecture centrale a été conçue en 1989/1990. Différentes initiatives ont été lancées pour intégrer les GNSS dans l'ETCS, en raison de leur potentiel de réduction des infrastructures sur les voies puisque cela permettrait d'éliminer les [Eurobalises](#) utilisées comme repères de position. Cela permettrait non seulement de réduire le coût de la signalisation, mais également d'accroître la disponibilité ainsi que de réduire les exigences en matière d'ingénierie et d'entretien et l'exposition au vol, au vandalisme, etc.

Est également étudiée l'inclusion dans l'ERTMS/ETCS de nouvelles fonctionnalités supplémentaires qui pourraient dépendre fortement des GNSS, telles que la **surveillance de l'intégrité des trains**, une fonction du [niveau 3 du système ERTMS](#) qui, grâce au positionnement absolu des trains, permettrait de réduire la séparation des trains, d'optimiser le trafic et de générer des effets positifs sur l'environnement.

Les **principaux défis techniques** auxquels est confrontée l'exploitation des GNSS sur les lignes ferroviaires sont liés à l'environnement, lequel diffère sensiblement de celui des applications aériennes et maritimes. Les différences majeures résident dans la visibilité des satellites, qui est limitée et change constamment, dans l'atténuation des signaux, dans les interférences électromagnétiques et dans la considérable propagation multivoie. À certains endroits, comme dans les zones urbaines et montagneuses, ces effets peuvent tous apparaître simultanément. De plus amples informations sont disponibles dans le [rapport de l'EUSPA sur les besoins des utilisateurs du secteur ferroviaire](#).

Aujourd'hui, les GNSS sont principalement utilisés dans le secteur ferroviaire pour des **applications non liées à la sécurité**. Les systèmes d'information des voyageurs sont les principales applications, même si la gestion des actifs gagne en importance. Au cours des prochaines années, de plus en plus d'applications utiles liées à la sécurité, à la signalisation et au contrôle des trains qui seront fondées sur les GNSS seront développées pour compléter les technologies traditionnelles. En ce qui concerne les **applications critiques pour la sécurité**, l'EUSPA a élaboré une [feuille de route pour l'adoption des GNSS européens dans le secteur ferroviaire](#). Cette feuille de route, approuvée par les principales parties prenantes du secteur ferroviaire et spatial, résume les principales activités destinées à rendre l'ERTMS compatible avec les GNSS européens et permet une orientation élémentaire des activités en vue de la réalisation de cet objectif.

En 2022, la [résolution du Parlement européen sur la sécurité et la signalisation ferroviaire évaluant l'état d'avancement du déploiement de l'ERTMS](#) a souligné la nécessité d'assurer dès que possible des synergies entre l'ERTMS et les GNSS européens. Cette recommandation a bien été prise en considération dans le secteur ferroviaire, avec par exemple la mise au point d'un prototype d'unité embarquée de localisation de train ([projet CLUG financé par Horizon 2020](#)).

La Commission européenne continue également d'étudier les possibilités d'utilisation ou d'évolution des services des GNSS européens pour des applications critiques pour la sécurité ferroviaire. À l'heure actuelle, deux études de mission sont en cours pour clarifier les paramètres d'un service des GNSS européens propre au secteur ferroviaire qui pourrait répondre aux exigences des utilisateurs en matière de signalisation ferroviaire et d'ERTMS ([EGNSS-R](#) et [IMPRESS](#)).

Les [spécifications techniques d'interopérabilité \(STI\)](#) définissent les normes techniques et opérationnelles auxquelles chaque sous-système ou partie de sous-système doit se conformer pour satisfaire aux exigences essentielles et assurer l'interopérabilité du système ferroviaire de l'Union européenne. En particulier, **l'inclusion des GNSS dans la STI «contrôle-commande et signalisation» est également une condition préalable à l'adoption à grande échelle des GNSS en tant que solution de repli pour la localisation des trains dans l'Union européenne**. La dernière modification de ce document a été adoptée en juin 2019 et la prochaine version est prévue en 2023. En outre, une version de maintenance de la STI est prévue en 2026 et une version actualisée contenant de nouvelles fonctionnalités sera adoptée en 2028/2029.



### 3.4.8 Agriculture

Face aux prévisions de croissance de la population mondiale, qui devrait atteindre 9,7 milliards d'habitants d'ici à 2050, à l'augmentation de l'apport calorique chez des personnes de plus en plus riches et à la hausse de la demande de denrées alimentaires en résultant, il est indispensable d'intensifier la production alimentaire, ainsi qu'il ressort du [rapport de l'EUSPA sur les besoins des utilisateurs du secteur agricole](#). Il y a lieu de mettre en place une stratégie globale pour la sécurité alimentaire mondiale dans laquelle les **solutions fondées sur les technologies de l'information** joueraient un rôle essentiel. Compte tenu de la **prépondérance des GNSS**, d'autres technologies telles que le SIG (système d'information géographique), la télédétection par satellite ou UAS (système d'aéronef sans équipage à bord), les capteurs optiques pour mesurer la teneur en azote et l'état des canopées, les systèmes de vision automatique, les capteurs gamma-radiométriques du sol, etc. ont été déployées dans un large éventail d'applications. L'utilisation de ces différentes technologies habilitantes et la combinaison des différents types de données qu'elles génèrent ont donné lieu à l'**agriculture de précision**, qui a fait ses preuves en ce qui concerne l'amélioration des rendements et de la productivité parallèlement à la maîtrise des coûts et à la réduction des incidences environnementales des activités agricoles.

L'adoption par le marché d'applications de l'**agriculture de précision exploitant les GNSS** augmentera parallèlement à la nécessité d'accroître la production alimentaire. La précision restera le paramètre GNSS le plus important pour les agriculteurs. La fiabilité, la disponibilité, l'authenticité et la couverture joueront également un rôle dans des applications spécifiques. Les **solutions fondées sur les SBAS**, qui améliorent la précision, l'intégrité et la disponibilité des signaux GNSS de base, deviennent de plus en plus répandues dans les applications de l'agriculture de précision et sont souvent l'option privilégiée pour les agriculteurs qui entrent sur le marché de l'agriculture de précision. Disponibles à des échelles continentales, sans frais d'abonnement ni coûts d'investissement supplémentaires, ces solutions sont largement utilisées par les agriculteurs qui exigent une précision submétrique. Des **solutions haute précision (en dessous du décimètre)**, nécessaires pour l'automatisation, sont fournies par les services de RTK/RTK en réseau et les services de PPP en temps réel, qu'il s'agisse de services commerciaux ou de services institutionnels tels que le service haute précision de Galileo.

L'intégration du positionnement par GNSS dans les **systèmes d'information de gestion agricole (FMIS)** et l'utilisation d'informations supplémentaires provenant de différents capteurs, y compris l'observation de la Terre, devraient révolutionner l'agriculture de précision et stimuler davantage encore son adoption. Les FMIS sont des systèmes de collecte, de traitement, de stockage et de fourniture de données qui permettent aux agriculteurs de prendre des décisions et d'élaborer leur stratégie de gestion en toute connaissance de cause. **Les GNSS relient ces données à des coordonnées géographiques précises.**

Malgré les niveaux variables de succès et d'adoption des différentes solutions agricoles fondées sur les technologies, l'intégration et la propagation de celles-ci nécessitent de **relever plusieurs défis technologiques, économiques et de sensibilisation**. Récemment, le [groupe de réflexion sur l'intégration de l'agriculture de précision](#), créé par le partenariat européen pour l'innovation dans l'agriculture, a placé en tête de sa liste de recommandations la «nécessité pour les agriculteurs et les coopératives de jouer un rôle majeur dans l'innovation et dans la recherche sur les systèmes d'aide à la décision et les solutions techniques aux problèmes actuels».

Plusieurs initiatives facilitent l'adoption des GNSS européens dans le secteur agricole européen.

**EGNSS4CAP** est une **application pour téléphone portable** sous Android et iOS qui **numérise les procédures afin de permettre aux agriculteurs** de l'Union européenne de satisfaire à leurs obligations de déclaration dans le cadre de la [politique agricole commune \(PAC\)](#) actuelle et de sa réforme pour l'après-2020.

Les nouvelles règles adoptées par la Commission européenne pour la PAC actuelle et à venir permettent d'**utiliser un large éventail de technologies satellitaires** modernes afin de gérer et de contrôler les **paiements à la surface**. Par exemple, des procédures de contrôle automatique fondées sur les données et les signaux provenant des programmes Copernicus et Galileo peuvent être utilisées pour réduire le nombre de contrôles sur place. Ces procédures font partie du mécanisme de contrôle de suivi (CbM) et sont appliquées dans un certain nombre d'États membres sur une base volontaire.

Dans le cadre de la **nouvelle PAC**, le système de suivi des surfaces (AMS) sera mis en place. Avec l'adoption de ce mécanisme, tous les États membres devront **contrôler 100 % des paiements à la surface**. L'utilisation de ces

technologies s'inscrit dans le cadre de l'engagement constant de la Commission européenne de moderniser et de simplifier les processus du système intégré de gestion et de contrôle (SIGC) dans le cadre de la PAC.

L'application EGNSS4CAP utilisera les différenciateurs des GNSS européens pour permettre aux agriculteurs de fournir des photographies géolocalisées et des mises à jour du SIPA (système d'identification des parcelles agricoles) soutenant et complétant l'approche de suivi de la PAC fondée sur les Sentinelles de Copernicus.

Cet outil est open source et gratuit et peut être intégré par tout développeur Android ou iOS. Les appareils du marché de masse, tels que les téléphones intelligents et les tablettes, pourront exécuter cette application et utiliser les GNSS pour localiser et dater la photographie en garantissant la précision et l'authentification requises pour les déclarations destinées aux organismes payeurs.

L'[outil de gestion pour une agriculture durable \(FaST\)](#) est une plateforme de services numériques qui met des capacités dans les domaines de l'agriculture, de l'environnement et de la durabilité à la disposition des agriculteurs de l'UE, des organismes payeurs des États membres, des conseillers agricoles et des développeurs de solutions numériques. FaST aidera les agriculteurs dans leurs processus de prise de décision administrative, améliorant la rentabilité de l'exploitation et la durabilité environnementale.

Les **GNSS européens feront partie intégrante de FaST**, car ils permettront aux agriculteurs d'associer les données d'observation de la Terre à un positionnement en temps réel, ainsi que de communiquer des informations géolocalisées aux autorités des États membres.

Bien qu'elles ne soient pas considérées comme une source principale d'informations pour le **système d'identification des parcelles agricoles (SIPA)**, les données collectées in situ sur la base des **GNSS apportent une contribution précieuse** au maintien à jour du SIPA. La plupart des informations recueillies sur place grâce aux GNSS qui sont utilisées pour le SIPA sont collectées lors des contrôles sur place classiques des déclarations des agriculteurs. En outre, les inspecteurs sur le terrain sont tenus de signaler toute parcelle de référence inexacte et la couche SIE. Certains États membres effectuent aussi, occasionnellement, des enquêtes de terrain plus systématiques à l'aide des GNSS.

La [nouvelle vision du SIGC en action \(NIVA\)](#) modernise le SIGC au moyen de solutions numériques et d'outils électroniques, en le dotant de méthodes fiables et d'ensembles de données harmonisés pour le suivi des performances agricoles, tout en allégeant la charge administrative qui pèse sur les agriculteurs, les organismes payeurs et les autres parties prenantes.

Le cas d'utilisation [UC4a «Photographie géolocalisées»](#) du projet NIVA consiste à concevoir et à développer une application pour appareil mobile visant à faciliter la publication, par l'agriculteur et/ou un conseiller, d'une photographie géolocalisée à l'appui de ses demandes d'aide. Ce projet exploitera les nouvelles fonctionnalités des GNSS empêchant le leurrage (par exemple, l'authentification du signal Galileo). L'application montrera des moyens de recevoir les notifications du système de soutien et aura la capacité d'informer et d'orienter les agriculteurs pour leur permettre de correctement localiser, aligner, cadrer et prendre en photo les points d'intérêt demandés.

L'utilisateur final bénéficiera d'un plus grand nombre de possibilités d'interaction avec l'organisme payeur. Les agriculteurs peuvent réduire le nombre de contrôles sur place en joignant les preuves photographiques de l'activité ou en clarifiant leur requête. L'administration disposera d'un enregistrement électronique de la réponse et d'un profil complet de l'activité agricole menée sur la parcelle.

Dans le cadre des programmes écologiques relatifs à l'[agriculture de précision](#), les GNSS européens pourraient aider les agriculteurs à améliorer les plans de gestion des nutriments, à réduire les intrants (engrais, eau, produits phytopharmaceutiques) et à améliorer l'efficacité de l'irrigation ou le suivi de l'utilisation des pesticides en enregistrant avec précision le lieu d'épandage des pesticides.

### 3.4.9 Services dépendant de la localisation

L'appareil de navigation le plus utilisé est notre téléphone portable, et le PNT y est principalement utilisé pour des applications de services dépendant de la localisation. Dans un contexte d'urbanisation mondiale et de villes intelligentes, les **services dépendant de la localisation qui exploitent les GNSS répondent à certaines des préoccupations économiques et sociétales les plus immédiates** telles que l'amélioration de la productivité du travail, la facilité de circulation, le suivi des personnes, la gestion des ressources et l'efficacité des services pour faciliter les interactions entre les consommateurs ([rapport de l'EUSPA sur les besoins des utilisateurs de services fondés sur la localisation](#)).

Les solutions fondées sur les GNSS englobent une multitude d'applications: navigation, cartographie, SIG (système d'information géographique), géomarketing et publicité, sécurité et gestion des situations d'urgence, sports, jeux, santé, pistage, réalité augmentée, réseaux sociaux, infodivertissement, etc. Plusieurs de ces applications nécessitent des niveaux stricts de précision horizontale et verticale et une authentification du positionnement (citons, par exemple, la facturation basée sur la localisation pour prévenir les fraudes).

Les activités de normalisation liées aux services dépendant de la localisation peuvent être classées en activités ayant trait aux exigences **de signalisation et de performance** pour le positionnement, y compris les GNSS et GNSS assistés, et en activités relatives à des procédures d'**essai**. Les principaux organismes de normalisation sont le [projet de partenariat de 3<sup>e</sup> génération \(3GPP\)](#), l'[Open Mobile Alliance \(OMA\)](#), le [comité technique TC-SES \(stations terriennes de satellite\) de l'ETSI](#) et le CEN-CENELEC.

En vertu du [règlement délégué \(UE\) 2019/320 de la Commission](#), à compter du 17 mars 2022, tous les **téléphones intelligents mis sur le marché unique européen** doivent permettre d'envoyer des informations de localisation dérivées de l'appareil mobile à l'aide des signaux Galileo, en plus des autres GNSS, au **service d'urgence** du centre de réception des appels d'urgence (PSAP) le plus proche. Cette mesure vise à améliorer la localisation des [appels d'urgence sur le numéro 112](#) afin d'accélérer les temps de réponse et de sauver ainsi davantage de vies ([rapport de marché 2022 de l'EUSPA sur l'observation de la Terre et les GNSS — services dépendant de la localisation](#)). Les exigences sont déjà respectées par une grande majorité des téléphones intelligents, lesquels sont évalués par les organismes notifiés au moyen de procédures d'évaluation de la conformité, sur la base de [lignes directrices](#) de la Commission européenne. La fonctionnalité en question est activée pays par pays en fonction de l'état de préparation technique et opérationnelle de la [localisation mobile avancée \(AML\)](#).

Deux normes pour les téléphones intelligents 4G et 5G, publiées par le 3GPP en 2020 et 2021 ([3GPP TS 36.171 version 16.1.0 Release 16](#) et [3GPP TS 38.171 version 16.2.0 Release 16](#)) et concernant les *exigences relatives à la prise en charge des systèmes mondiaux de navigation par satellite assistés (A-GNSS)*, prévoient une approche «agnostique sur le plan des constellations» (autrement dit, le fabricant de l'appareil doit sélectionner le système dont le satellite présente le niveau de signal le plus élevé). Il s'agit là d'une démarche importante en matière de sécurité pour abandonner l'«approche centrée sur le système GPS», indépendamment du délai d'obtention de la première position fourni par les autres constellations.

À la suite de la [disponibilité des pseudodistances sur le système d'exploitation Android](#), le groupe de travail sur les mesures brutes vise à combler le fossé de connaissances entre les utilisateurs de mesures brutes et les industries. En outre, des **campagnes d'essai menées par l'EUSPA/le JRC** visant à évaluer les caractéristiques de performances et de fonctionnalités qui ciblent spécifiquement les téléphones intelligents et les autres appareils du marché de masse sont en cours.

Enfin, le [groupe de travail sur la navigation PNT 5G](#) contribue aux travaux du 3GPP sur le PNT et encourage l'**inclusion des GNSS européens dans l'écosystème PNT 5G** pour garantir que les spécifications techniques produites par le 3GPP tiennent également compte de la possibilité de **compléter les GNSS européens par la 5G** lorsque la couverture GNSS n'est pas disponible (par exemple, à l'intérieur des bâtiments), mais aussi pour améliorer la précision du positionnement en conditions nominales. En outre, l'architecture et les protocoles de positionnement 5G ont été adaptés ces dernières années pour soutenir la fourniture des données d'assistance nécessaires aux techniques GNSS haute précision (RTK ou PPP, par exemple), tant en monodiffusion qu'en radiodiffusion, les premiers produits et services commençant à faire leur apparition en Europe et aux États-Unis.

### 3.4.10 Recherche et sauvetage

L'**objectif des opérations mondiales de recherche et de sauvetage (SAR) est de localiser et d'aider rapidement les personnes en détresse**. Bien que les balises de recherche et de sauvetage ne soient pas toutes compatibles avec les GNSS, on observe une tendance croissante à l'adoption des GNSS dans ces balises.

Le [programme COSPAS-SARSAT](#) est un système international de détection des alertes de détresse par satellite pour les services de recherche et de sauvetage. Actuellement, le **service de recherche et de sauvetage de Galileo contribue** à ce système en relayant rapidement les signaux de détresse des balises radio vers les équipes de SAR concernées, au moyen de charges utiles ad hoc présentes à bord des satellites de Galileo et de trois stations terrestres déployées dans toute l'Europe (de plus amples informations sont disponibles à la section [3.2.7](#)). Le service de recherche et de sauvetage nécessite des récepteurs compatibles (balises).

La disponibilité du service de recherche et de sauvetage de Galileo est bénéfique à tous les secteurs dans lesquels, en raison de la nature de leurs activités, des vies humaines sont en jeu, notamment les secteurs aéronautique et maritime.

En ce qui concerne le secteur **maritime**, l'OMI a créé en 1988 le [système mondial de détresse et de sécurité en mer \(GMDSS\)](#), dans le but de toujours permettre aux navires d'envoyer et de recevoir des informations de sécurité maritime. Ce système est devenu opérationnel en 1997.

Les navires doivent être équipés de balises radio de localisation des sinistres (EPIRB) et de balises de localisation personnelle (PLB), qui, une fois activées, transmettent les informations nécessaires aux services d'urgence. Les balises AIS-SART (émetteur de recherche et de sauvetage) et AIS-MOB (pour situation d'homme à la mer) non seulement transmettent la position de la personne en détresse mais partagent également cette position, par l'intermédiaire du système d'identification automatique (AIS), avec les navires situés à proximité, en faisant apparaître un signal de détresse AIS sur le système électronique d'affichage de cartes et d'informations (ECDIS) de ces navires.

Dans le secteur **aéronautique**, à la suite des tragédies des vols Air France 447 et Malaysia Airlines 370 et compte tenu du temps nécessaire pour localiser l'aéronef, l'OACI a mis en place le [système mondial de détresse et de sécurité aéronautique \(GADSS\)](#), qui garantit que les aéronefs sont suivis et que leur dernière position connue dérivée des GNSS est toujours enregistrée, un enregistrement de la progression du vol étant tenu à jour. Conformément aux normes et pratiques recommandées (SARP) actuelles en matière de suivi des aéronefs, les aéronefs en conditions de vol normales doivent être localisés toutes les 15 minutes. La dernière mise à jour de l'annexe 6 de l'OACI exige une communication autonome de la position toutes les minutes lorsque l'aéronef est en détresse. La norme relative à l'élément de suivi de détresse du GADSS sera applicable à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2025 aux avions dont le premier certificat de navigabilité individuel aura été délivré le 1<sup>er</sup> janvier 2024 ou après cette date.

Les aéronefs doivent être équipés d'émetteurs de localisation d'urgence (ELT) ou de balises de localisation personnelle (PLB), qui facilitent les opérations de recherche et de sauvetage en cas d'incident. Conformément aux exigences de l'annexe 10 de l'OACI (et aux normes prévues à l'annexe 6 de l'OACI) et en vertu des exigences de mise en œuvre du GADSS, de nombreux ELT utilisent les GNSS pour signaler leur position lorsqu'ils sont déclenchés.

Enfin, les services de recherche et de sauvetage sont également largement utilisés **sur terre**: il est conseillé aux alpinistes et aux randonneurs de se munir d'une balise PLB pour se faire localiser en cas de situation de détresse.

De plus amples informations sur le service de recherche et de sauvetage de Galileo sont disponibles sur la [page web de l'EUSPA](#). Le [rapport de marché 2022 de l'EUSPA sur l'observation de la Terre et les GNSS](#) contient des informations sur le marché des services de recherche et de sauvetage et le [rapport technologique de l'EUSPA sur les utilisateurs des GNSS](#) de l'EUSPA donne une vue d'ensemble des technologies existantes.

### 3.4.11 Cartographie et arpentage

**Le marché de la cartographie et de l'arpentage en général et l'utilisation des GNSS dans ces domaines devraient connaître un essor considérable au cours des années à venir**, en particulier dans les régions du monde où aucun autre système n'est en place ou dans lesquelles il n'existe pas de réseaux denses de géodésie terrestre. Une forte croissance est également attendue dans les régions enregistrant une activité de construction intense, où l'importance de l'arpentage cadastral augmentera en fonction de l'augmentation du PIB et de la population. Dans ce contexte, l'utilisation des GNSS à des fins d'arpentage répond à certaines des préoccupations économiques et sociétales les plus immédiates, telles que l'urbanisation accrue, la hausse de la demande d'hydrocarbures et la modernisation des besoins de transport, ainsi qu'il ressort du [rapport de l'EUSPA sur les besoins des utilisateurs du secteur de l'arpentage](#).

Les **solutions GNSS couvrent un large éventail d'applications**, notamment l'arpentage cadastral (délimitation des limites de propriété), l'arpentage de construction (relevés précis des bâtiments et des infrastructures), la cartographie (création de cartes affichant les points d'intérêt, généralement intégrées dans les systèmes d'information géographique), l'arpentage minier et l'arpentage marin (en mer et pour les cours d'eau).

Toutefois, le rôle des GNSS traditionnels à des fins d'arpentage connaît une transformation rapide en raison de l'intégration d'**applications émergentes**, telles que des applications optiques, multispectrales ou lidar (détection et télémétrie par la lumière), le balayage laser terrestre, le recours à des UAS (systèmes d'aéronefs sans équipage à bord), les unités de mesure inertielle, la SLAM (localisation et cartographie simultanées), la réalité augmentée, ou la cartographie mobile et collaborative. En outre, ces applications de géomatique émergentes ciblent principalement la mise en œuvre de solutions directement dans le nuage.

Grâce à la numérisation, la [modélisation des informations du bâtiment \(BIM\)](#) et les [systèmes d'information géographique \(SIG\)](#) sont désormais intégrés dans un environnement global unique pour produire des jumeaux numériques. Le processus de modélisation précise en 3D — commun à ces deux techniques — contribue à des **données de localisation GNSS haute précision**. Une fois stockées et traitées dans le nuage, les informations provenant des GNSS, des SIG et de la BIM permettent aux parties prenantes de l'ensemble du secteur de la construction de gérer à distance les données indépendamment de l'endroit et de produire pour les bâtiments et infrastructures de meilleurs plans, entraînant des économies à long terme.

L'urbanisme est un autre exemple. La SLAM (localisation et cartographie simultanées), avec ses lasers, unités de mesure inertielle et caméras, et les scanners laser portatifs ont ouvert de vastes possibilités pour une modélisation réaliste détaillée à l'intérieur des bâtiments. Lorsqu'ils sont associés à des récepteurs GNSS, ces systèmes assurent une transition ininterrompue entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments.

Face à l'apparition d'un nombre croissant de nouvelles méthodes et de nouveaux outils, **il sera nécessaire de prévoir des exigences et des normes bien définies**. Pour les systèmes de cartographie mobile, une série de normes encadrerait l'utilisation combinée des GNSS et du lidar, des caméras optiques, des instruments à inertie, des lasers et des compteurs kilométriques. Le positionnement ininterrompu extérieur/intérieur et le PPP-RTK représentent d'autres domaines clés devant être soumis à des exigences et à des normes strictes. Au vu de leurs progrès récents, les applications de réalité augmentée dépendant de la précision et de la disponibilité des GNSS bénéficieraient également de l'instauration de normes.

Pour satisfaire aux exigences strictes concernant la précision (au centimètre ou millimètre près) de la cartographie et de l'arpentage, des services de renforcement tels que le [positionnement cinématique en temps réel \(RTK\)](#), le [positionnement ponctuel précis \(PPP\)](#) et la nouvelle méthode PPP-RTK revêtent une importance capitale. Tant pour le [RTK](#) que pour le PPP, les corrections multi-GNSS sont prises en charge dans le protocole standard de la Commission technique radio pour les services maritimes (RTCM), que ce soit pour une station ou un réseau de référence unique (NTRIP) ou pour le PPP.

La mise en œuvre du **PPP-RTK** dans le cadre de la RTCM n'est pas encore disponible. Par conséquent, d'intenses efforts sont déployés pour obtenir la normalisation des corrections PPP-RTK au moyen de nouveaux messages dans le cadre du protocole de la RTCM, tandis que, dans l'intervalle, d'autres protocoles et normes ont été proposés par diverses parties prenantes du secteur et dans le cadre de différentes initiatives scientifiques (IGS, Sapcorda ou 3GPP, par exemple).

Pour relever les défis concernant les défauts liés à la disponibilité, la qualité, l'organisation, l'interopérabilité, l'accessibilité et le partage des **informations géographiques**, qui sont communs à de nombreux secteurs et à différents niveaux d'autorité publique en Europe, l'UE a adopté la [directive établissant une infrastructure d'information géographique dans la Communauté européenne \(INSPIRE\)](#). Cette directive renforcera le **partage d'informations géographiques environnementales** entre les organisations du secteur public et facilitera davantage l'accès du public aux informations environnementales dans toute l'Europe. La cartographie et l'arpentage, qui utilisent des services et des outils de collecte de données géographiques, y compris sur la base des GNSS européens, sont directement liés à la directive INSPIRE.

Sur cette base, il est essentiel de garantir la capacité de combiner des données géographiques et des services provenant de différentes sources (interopérabilité des données) dans l'ensemble de l'UE de manière cohérente et sans efforts supplémentaires de la part des humains ou des machines. L'interopérabilité des données au titre de la directive INSPIRE est assurée, entre autres, par l'**obligation d'utiliser un système de coordonnées commun, le système de référence terrestre européen 1989 (ETRS89)**. Cela garantit que les données géospatiales tirées des GNSS européens sont pleinement compatibles avec les applications des utilisateurs finaux et y sont pleinement intégrées, ce qui permet d'accélérer l'utilisation des GNSS européens.

La **commande des machines** est un élément important et de plus en plus essentiel du marché de l'arpentage. Ainsi qu'il ressort du [rapport de l'EUSPA sur les besoins et les exigences des utilisateurs du secteur de la cartographie et de l'arpentage](#), les marchés cibles les plus importants sont les secteurs de la **construction** et de l'extraction **minière** (par exemple, la commande et l'orientation semi-automatique des véhicules dans les engins de terrassement ou les équipements miniers), dans lesquels une précision centimétrique est nécessaire pour accroître la productivité et réduire les coûts. Récemment, les **opérations en port** à sec sont devenues un nouveau marché, dans lequel, contrairement à ce qui se passe dans les deux autres segments, où la commande des machines est mise en œuvre par les constructeurs des véhicules, les opérations portuaires sont exécutées par les producteurs de grues, qui intègrent dans le matériel des logiciels de logistique et de gestion portuaire. Les principaux avantages sont la gestion du chargement des navires, la logistique du chargement, l'accélération des opérations et la sécurité. Cela permet, avec l'utilisation des GNSS et de différents systèmes PNT, de créer un savoir-faire européen unique.

La [directive relative aux machines \(2006/42/CE\)](#), qui fixe des exigences pour les machines, les composants de sécurité, les accessoires de levage (tels que les chaînes et les câbles) et d'autres produits connexes, est largement utilisée par les fabricants de l'UE pour garantir un niveau de sécurité commun dans les machines mises sur le marché et pour conserver leurs droits de propriété intellectuelle (DPI) au sein de l'UE.



### 3.4.12 Secteurs ayant besoin de services de datation et de synchronisation précis (finance, réseaux électriques, communication)

La distribution d'électricité, l'exploitation des réseaux de télécommunications, l'horodatage des opérations financières, les systèmes de gestion du trafic aérien, les systèmes de transport, les plateformes satellitaires, les systèmes de distribution d'eau et de traitement des eaux usées, les applications scientifiques (astronomie, physique des particules, géophysique, métrologie), la télédiffusion numérique, les réseaux LTE de petites cellules (femtocellules, picocellules et microcellules) et l'internet des objets (IdO) ne sont que quelques exemples de la **myriade d'applications ayant besoin des GNSS à des fins de datation et de synchronisation** (de plus amples informations sont disponibles dans le [rapport du centre de services GNSS sur les besoins des utilisateurs des services de datation et de synchronisation](#) et dans le [rapport technologique du centre de services GNSS sur les utilisateurs des GNSS](#)).

Bien qu'elle soit relativement inconnue du public, la **capacité de datation et de synchronisation offerte par les systèmes de navigation par satellite** est devenue **essentielle pour les infrastructures critiques**. La **robustesse et la résilience des services de datation et de synchronisation sont fondamentales** pour éviter les graves perturbations du fonctionnement des infrastructures critiques. En outre, les infrastructures étant fortement interconnectées, le renforcement de la résilience du réseau ne peut être réalisé par un État membre seul.

**Galileo**, utilisé comme source principale d'informations de synchronisation ou comme solution de redondance, **contribuera au renforcement de la résilience des services de synchronisation des GNSS**, en améliorant la disponibilité de ces services (car fournissant une autre constellation indépendante) et en apportant des valeurs ajoutées telles que l'authentification, qui accroît la résilience au leurrage.

**EGNOS** fournit des informations de synchronisation qui proviennent de satellites géostationnaires ou de son service terrestre d'accès aux données (EDAS), ce qui permet aux utilisateurs d'accéder aux données en ligne en temps réel et par l'intermédiaire de deux canaux différents.

Dans l'UE, une étape majeure a été la création officielle du [service de datation de Galileo](#) dans le cadre de la mission de la deuxième génération de Galileo. Ce service autonome tire parti des capacités de synchronisation intrinsèques de Galileo en tant que GNSS et apporte des fonctionnalités supplémentaires pour mieux répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs des services de datation et de synchronisation:

- une **disponibilité élevée** du service de datation dans son ensemble;
- une **précision améliorée** pour tous les paramètres de synchronisation;
- des **exigences spécifiques** pour le temps du système Galileo (GST), ce qui en fait une référence très performante pour les applications de synchronisation;
- une **fonction de contrôle du service de datation de Galileo**, qui renforcera considérablement la robustesse de ce service et la confiance dans les solutions de synchronisation passant par Galileo. Grâce à cette fonction de contrôle, les utilisateurs seront informés, au moyen de signalements spécifiques, des défauts susceptibles d'avoir une incidence sur la conformité avec les niveaux de services en matière de datation.

Le concept du service de datation de Galileo comprend également l'élaboration d'une **norme pour les récepteurs de datation Galileo**. Cette norme garantira la contribution correcte du récepteur utilisateur en tant que maillon fondamental de la performance de bout en bout. Elle couvrira aussi la mise en œuvre de garde-fous locaux, tels que le contrôle autonome de l'intégrité par le récepteur du point de vue de la datation (T-RAIM), afin d'améliorer encore la robustesse globale. L'élaboration de cette norme, la toute première ayant trait aux récepteurs de datation GNSS, est officiellement en cours au sein du CEN-CENELEC.

Enfin, des services de datation précis sont également fournis par des technologies non GNSS qui renforcent encore les services de datation fondés sur les GNSS ou servent de solutions de repli: citons par exemple les systèmes à ondes longues (appendice A, section 5.2.7) et les technologies émergentes (appendice A, section 5.3). La fourniture de services de synchronisation de substitution est déjà une réalité sur le marché de l'Union européenne, ainsi que l'a confirmé une [étude réalisée en 2022](#) par la Commission européenne. Il existe sur le marché des [services de synchronisation de substitution matures](#) qui **communiquent** une datation précise sur de longues distances, tandis que l'UE dispose d'un réseau unique d'instituts nationaux de métrologie (INM) qui peuvent être utilisés pour **générer** un temps précis synchronisé avec l'UTC(k).

### 3.4.13 Utilisateurs du secteur spatial

Le **marché des GNSS dans le secteur spatial évolue très rapidement** depuis ces dix dernières années, ce qui a entraîné un changement de paradigme radical dans l'industrie spatiale. Caractérisée par l'ouverture du secteur à des acteurs non gouvernementaux et davantage axés sur les entreprises, une approche de l'espace novatrice, centrée sur les aspects commerciaux, a vu le jour, ce qui, associé aux importantes avancées technologiques, a été à l'origine de l'augmentation du nombre de satellites et de services spatiaux. Au début du troisième millénaire, quelque 800 satellites étaient en orbite active autour de la Terre. Vingt ans plus tard, on en compte plus de 3 000 et ce nombre devrait quadrupler au cours de la prochaine décennie. La mise en place de nouveaux systèmes de mégaconstellations de satellites en orbite terrestre basse (LEO) est un élément caractéristique de cette nouvelle ère qui met en avant la démocratisation de l'espace dans notre société et la convergence du secteur avec la numérisation grandissante des activités humaines.

Aujourd'hui, les satellites sont fabriqués par lots, les lancements sont presque quotidiens, les équipements sont produits en masse et les processus s'industrialisent; dans ce contexte, l'espace est de plus en plus perçu comme un bien et **les récepteurs GNSS spatiaux deviennent de plus en plus courants** et importants pour les utilisateurs du secteur spatial, depuis les altitudes LEO (300 kilomètres) jusqu'à l'orbite de transfert lunaire (MTO).

Les récepteurs GNSS spatiaux **ne sont pas fondamentalement différents des récepteurs GNSS classiques**. Ils effectuent les mêmes opérations et fournissent les mêmes services de PVT, mais ils doivent répondre aux **contraintes spécifiques de l'environnement spatial** (dynamique élevée, puissance et visibilité réduites du signal ou rayonnement solaire, par exemple). En fonction de la mission attendue du véhicule spatial, le rôle du récepteur GNSS embarqué varie. Bien qu'ils puissent être utilisés comme des sous-systèmes de guidage et de contrôle de la navigation (c'est-à-dire à des fins précises de détermination de l'orbite, de détermination de l'attitude ou de synchronisation), ces récepteurs peuvent également être utilisés comme des charges utiles servant directement aux objectifs de la mission (par exemple, mesures de l'occultation radio).

Les **avantages des solutions GNSS embarquées à bord des véhicules spatiaux** vont de la réduction de la dépendance du véhicule à l'égard des stations au sol à l'amélioration des performances de navigation. La sécurité des infrastructures spatiales est également devenue un moteur de développement dans le secteur spatial, étant donné que la menace que représentent les capacités de contre-espace offensives augmente. Afin de faciliter le développement, pour les utilisateurs du secteur spatial, de solutions GNSS qui profiteraient de l'utilisation combinée des systèmes de navigation mondiaux et régionaux existants, le [comité international sur les systèmes mondiaux de navigation par satellite \(ICG\)](#) a publié le [volume des services spatiaux GNSS interopérables](#), dans le but de tirer parti des avantages offerts par les systèmes de navigation mondiaux et régionaux existants lorsqu'ils sont utilisés ensemble pour améliorer les capacités.

Dans l'UE, la principale initiative visant à faciliter l'utilisation de Galileo par les utilisateurs du secteur spatial est la définition formelle du **volume des services spatiaux Galileo** dans le cadre de la mission de la **deuxième génération de Galileo** (de plus amples informations sont disponibles dans la section [3.2.1.2](#)). Cela garantira la mise en œuvre de toutes les activités requises, afin de permettre à Galileo de prendre des engagements sur le niveau de performance que les utilisateurs du secteur spatial peuvent escompter lorsqu'ils utilisent les signaux dans l'espace de Galileo. Il importe de rappeler que, parmi les GNSS les **signaux Galileo sont ceux qui conviennent le mieux aux utilisateurs du secteur spatial**, et ce grâce aux altitudes plus hautes des satellites de Galileo et aux capacités d'authentification offertes par le [service d'authentification des messages de navigation en libre service de Galileo](#).

Enfin, la **validation** de la performance de la **détermination précise de l'orbite à partir des signaux Galileo** dans une configuration typique de récepteur à bas coût est en cours dans le cadre du projet [Démonstration/validation en orbite \(IOD/IOV\) financé par Horizon 2020](#).

De plus amples informations sont disponibles dans le [rapport de l'EUSPA sur les besoins des utilisateurs du secteur spatial](#).

### 3.4.14 Sécurité et défense

**Les opérations de sécurité et les opérations militaires dépendent fortement de données et de capacités exploitant les technologies spatiales**, y compris celles à double usage, pour fournir des services sûrs, fiables et hautement performants dans un environnement de menace en évolution. La [boussole stratégique en matière de sécurité et de défense](#) a qualifié l'espace de domaine stratégique et a appelé à adopter une [stratégie spatiale de l'UE pour la sécurité et la défense](#), laquelle a été publiée en mars 2023.

Le [programme de recherche et d'innovation en matière de sécurité](#) de l'UE et les actions de recherche et de développement (R&D) du [pôle 3 «Sécurité civile pour la société» d'Horizon Europe](#) et ses précurseurs dans le cadre d'[Horizon 2020](#), du [7<sup>e</sup> programme-cadre](#) et de l'[action préparatoire sur la recherche en matière de sécurité \(PASR\)](#), qui a financé plus de 700 projets depuis 2004, encouragent la coopération et incluent le développement et l'exploitation des services PNT/GNSS pour les praticiens de la sécurité tels que les services répressifs, la gestion des frontières, la sécurité maritime, la protection des infrastructures critiques et la résilience face aux catastrophes. **Les projets de sécurité au titre du pôle 3 d'Horizon Europe imposent l'utilisation du programme spatial de l'UE chaque fois que des capacités pertinentes en matière de PNT sont développées.**

Les actions de R&D relevant du [Fonds européen de la défense \(FED\)](#) et de ses précurseurs, le [programme européen de développement industriel dans le domaine de la défense \(EDIDP\)](#) et l'[action préparatoire concernant la recherche en matière de défense \(PADR\)](#), comprennent le renforcement de Galileo et d'autres technologies PNT pour les utilisateurs militaires. Le FED encourage la coopération entre les entreprises et les acteurs de la recherche de toutes tailles et de toutes origines géographiques dans l'UE, l'objectif étant la mise au point de technologies et d'équipements de défense de pointe interopérables. Il vise également à améliorer les performances et la résilience des capacités PNT afin d'atteindre l'objectif d'un «accès ininterrompu au PNT dans le monde entier».

Parmi les nombreux projets retenus, les actions de R&D suivantes présentent un intérêt pour les services PNT:

- [GEODE — Galileo pour la défense de l'UE](#), EDIDP 2019: ce projet servira à développer, tester et qualifier de multiples solutions PNT compatibles avec le service public réglementé (PRS) de Galileo pour des exigences et applications spécifiques en matière de défense (7 modules de sécurité PRS, 9 récepteurs PRS, 4 antennes à diagramme de rayonnement contrôlé compatibles GPS/PRS) ainsi qu'une installation européenne d'essai et de qualification PNT. Une infrastructure PRS sera également développée pour garantir la disponibilité des actifs de sécurité nécessaires aux essais opérationnels des récepteurs. Des essais opérationnels militaires sur le terrain seront organisés sur des plateformes navales et terrestres, dans des systèmes d'aéronefs télépilotés et dans le système de datation et de synchronisation de plusieurs États membres;
- [QUANTAQUEST](#), PADR 2019: ce projet contribuera à l'applicabilité des technologies quantiques dans le domaine militaire et à l'autonomie stratégique de l'Europe. La navigation et la synchronisation seront assurées au moyen d'un capteur entièrement autonome basé sur une puce à atomes froids et un circuit intégré photonique offrant les performances et la portabilité requises. La communication sécurisée sera améliorée par un nouveau système de modulation visant à mettre en œuvre la distribution quantique de clés. La compatibilité des opérations sur le terrain sera garantie par une approche en espace libre.;
- [NAVGUARD](#), FED 2021: ce projet renforcera la résilience du PRS de Galileo au moyen de nouveaux systèmes terrestres et spatiaux. Il servira à développer une capacité européenne de guerre de la navigation (NAVWAR) fondée sur la surveillance du spectre GNSS sur la base de systèmes terrestres et spatiaux afin de détecter les activités illégales dans les bandes de fréquences GNSS et de géolocaliser leurs sources. Il servira également à concevoir, développer et tester un sous-système de gestion de l'information ainsi qu'une interface utilisateur pour faire le point sur la connaissance de la situation. Cinq récepteurs mobiles PRS différents ainsi qu'une démonstration en orbite d'un système de renforcement spatial du PRS contribueront à la capacité globale de NAVWAR;
- [AI-ARC](#) et [FOLDOUT](#): ces projets permettront de renforcer et d'exploiter les capacités PNT pour la sécurité maritime et la surveillance civile.

### 3.4.15 Besoins des utilisateurs de transports multimodaux

**Les GNSS sont utilisés par les opérateurs de transport et les prestataires de services à la demande** de diverses manières, allant d'une gestion plus efficace de la flotte à la fourniture d'informations précises aux voyageurs. **Les solutions GNSS peuvent également permettre un développement plus poussé de types de transport durables** en servant de base à la mobilité partagée, comme les véhicules partagés ou les vélos flottants.

Si l'utilisation actuelle des GNSS dans les transports publics est relativement limitée par rapport à ce que l'on observe dans d'autres secteurs, un nombre croissant d'opérateurs de transport public utilisent des applications fondées sur Galileo pour leurs activités quotidiennes. Cette **tendance à la hausse de l'utilisation de solutions GNSS** ne se limite pas aux transports publics, mais se reflète également dans les solutions du segment de plus en plus important de la mobilité en tant que service, ainsi qu'il ressort du [rapport de l'EUSPA sur les besoins des utilisateurs du secteur des transports publics](#). Les GNSS sont utiles pour fournir aux voyageurs des informations en temps réel sur la localisation des véhicules (transports publics et à la demande) et sur les retards, conformément au [règlement délégué \(UE\) 2017/1926 de la Commission](#) concernant les services d'informations sur les déplacements multimodaux.

Deux grandes catégories sont concernées par l'utilisation accrue des services GNSS:

- la **mobilité intelligente**: des transports publics efficaces nécessitent des solutions GNSS plus performantes. Dans ce contexte, l'utilisation de récepteurs multiconstellations et multifréquences permettra d'améliorer le positionnement en milieu urbain pour répondre aux applications les plus exigeantes, telles que l'évitement des collisions, le maintien dans la voie et le freinage automatique; l'authentification, l'intégrité et la robustesse seront nécessaires à cette fin. En outre, l'association de plus en plus fréquente de plusieurs modes de transport dans le cadre d'un même trajet nécessite des informations en temps réel sur la localisation des véhicules et les retards;
- les **applications critiques pour la sécurité**, telles que le freinage d'urgence pour les tramways ou la commande des portes dans les trains, qui peuvent être activées grâce aux signaux et à des services spécifiques des GNSS européens (service d'authentification des messages de navigation en libre service de Galileo, service haute précision de Galileo).

### 3.4.16 Transport de marchandises et logistique

La transformation numérique du secteur du transport de marchandises et de la logistique, en particulier la mise en œuvre du [règlement \(UE\) 2020/1056 concernant les informations électroniques relatives au transport de marchandises](#) et les travaux du [forum sur la numérisation des transports et de la logistique](#), axés sur le système électronique d'information sur les transports et le fret par corridor, offrent la possibilité de mettre au point une série de **nouveaux services pour des transports et une logistique multimodaux, y compris les technologies PNT**.

Citons comme exemples d'utilisation des GNSS dans ce secteur:

- le **suivi en temps réel des conteneurs** dans la chaîne logistique multimodale et entre différents modes et acteurs de la logistique, rendu possible grâce à l'accès en temps réel aux informations PNT. Cela permet également de déployer des systèmes de télésurveillance et de diagnostic en temps réel;
- l'utilisation des données PNT pour connecter le **transport de marchandises dangereuses** aux services d'urgence en cas d'accident, en indiquant la localisation en temps réel du véhicule transportant des marchandises dangereuses et le contenu exact de sa cargaison;
- l'amélioration des **services de gestion du fret** par les parties prenantes du secteur des transports, telles que les prestataires de services ferroviaires, qui sera de plus en plus centrée sur les actifs. La numérisation est bénéfique pour les opérateurs ferroviaires et les gestionnaires d'infrastructures car elle leur permet d'améliorer la **gestion des actifs** et leur entretien, réduisant ainsi les coûts d'exploitation. Le transport de marchandises faisant intervenir des récepteurs GNSS pour suivre le matériel roulant est reconnu par la Commission européenne comme étant durable, intelligent et sûr (plus de 50 000 wagons de transport de marchandises de plusieurs entreprises ferroviaires de l'UE sont déjà équipés de solutions télématiques utilisant les GNSS).

De plus amples informations sont disponibles dans le [rapport de marché 2022 de l'EUSPA](#).

### 3.5 Coopération de l'UE en matière de navigation par satellite

L'UE coopère avec plusieurs pays et organisations internationales dans le domaine de la navigation par satellite. Cette coopération va de la participation de pays tiers aux composantes du programme spatial de l'UE à une coopération fondée sur des accords de coopération concernant des GNSS.

En ce qui concerne la participation aux composantes du programme spatial de l'UE:

- la **Norvège** participe à [Galileo](#), [EGNOS](#) et [Copernicus](#) par l'intermédiaire des mécanismes de l'[Espace économique européen \(EEE\)](#);
- l'**Islande** participe à [EGNOS](#) et [Copernicus](#) par l'intermédiaire de l'Espace économique européen (EEE);
- la **Suisse** participe à [Galileo](#) et [EGNOS](#) sur la base de l'accord de coopération en matière de GNSS signé en 2013.

En outre, les **accords de coopération en matière de GNSS** ci-après existent:

- l'accord entre l'UE et la **Norvège** signé en 2009, qui couvre la sécurité, le contrôle des exportations et la protection du spectre radioélectrique ainsi que la sûreté des stations Galileo et EGNOS sur le territoire sous contrôle norvégien;
- l'accord entre l'UE et l'**ASECNA** (Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et à Madagascar) signé en 2016, qui concerne le développement de la radionavigation par satellite et la fourniture des services associés dans la zone de compétence de l'ASECNA au profit de l'aviation civile. Dans le cadre de cet accord, l'UE aide l'ASECNA à mettre en place un système de renforcement satellitaire;
- les accords conclus par l'UE avec la **Corée du Sud** et le **Maroc**, qui portent sur la protection du spectre, les normes, les échanges et la coopération scientifique et technique.

L'Union européenne et ses États membres entretiennent une **coopération privilégiée avec les États-Unis** dans le domaine de la navigation par satellite depuis 2004, lorsque les parties ont signé un [accord](#) sur [la promotion, la fourniture et l'utilisation des systèmes de navigation par satellite de Galileo et du GPS et les applications associées](#). Cette coopération vise à garantir l'interopérabilité au niveau utilisateur des systèmes GPS et Galileo et des systèmes de renforcement spatiaux au profit des utilisateurs civils. Elle vise également le maintien d'échanges loyaux sur le marché mondial de la navigation par satellite. L'accord entre l'UE et les États-Unis a été reconduit en 2022 par la [décision \(UE\) 2022/1089 du Conseil](#).

L'accord relatif aux systèmes GPS et Galileo a mis en place trois groupes de travail pour la coopération:

- le **groupe de travail A sur la compatibilité et l'interopérabilité des radiofréquences**: ce groupe de travail veille notamment à ce que Galileo et le GPS soient compatibles au niveau des radiofréquences, en partie grâce à la coordination dans le cadre de l'UIT, et vise à garantir autant que possible l'interopérabilité de leurs signaux civils respectifs au niveau des systèmes et des récepteurs. Il contribue également à la coordination des actions de l'UE et des États-Unis dans d'autres enceintes réglementaires au profit des GNSS;
- le **groupe de travail B sur les applications commerciales et civiles**: ce groupe de travail veille à ce qu'aucun obstacle réglementaire créé par l'une ou l'autre des parties n'entrave l'utilisation des systèmes GPS et Galileo et de leurs applications sur les marchés respectifs;
- le **groupe de travail C sur la conception et le développement de la prochaine génération de systèmes**: ce groupe de travail mène des activités structurées en trois axes, par l'intermédiaire de trois sous-groupes spécialisés:
  - le **sous-groupe «Évolutions»**, qui couvre les domaines suivants:
    - actions de R&D pour l'utilisation de l'ARAIM dans le secteur aéronautique et dans d'autres domaines, et contribution à l'élaboration de normes ARAIM pour le secteur aéronautique,
    - coordination des actions de R&D à long terme relatives aux systèmes GPS/WAAS et Galileo/EGNOS,

- coordination concernant la définition de la prochaine génération de SBAS pour les communautés d'utilisateurs autres que le secteur aéronautique,
- le sous-groupe «Fourniture de services», qui couvre les aspects stratégiques de la fourniture de services de navigation et le dialogue sur la fourniture des services GNSS, leur statut et les projets en la matière, tant pour les systèmes EGNOS/Galileo que pour les systèmes WAAS/GPS,
- le sous-groupe «Résilience», qui couvre ce thème essentiel qu'est la résilience des GNSS face à différents types de menaces. Ce sous-groupe élabore des cadres et des normes utilisés par l'OACI et d'autres organismes. Son objectif est donc de renforcer la résilience des systèmes GPS et Galileo, de leurs systèmes de renforcement et de leurs applications face aux brouillages préjudiciables. L'objectif à long terme consiste à élaborer des solutions et à proposer des recommandations susceptibles d'être intégrées dans les futurs récepteurs, systèmes et services.

L'UE participe au [comité international sur les systèmes mondiaux de navigation par satellite \(ICG\)](#), créé en 2005 par l'intermédiaire du Bureau des affaires spatiales des Nations unies. L'ICG encourage la coopération dans le domaine du PNT civil et des applications mondiales des technologies de navigation par satellite. Il facilite la coordination entre les fournisseurs de GNSS, les systèmes régionaux et les systèmes de renforcement, afin de favoriser la compatibilité, l'interopérabilité et la transparence et de promouvoir l'introduction et l'utilisation de ces services ainsi que leur amélioration future, y compris dans les pays en développement.

L'UE collabore également avec les États membres et d'autres pays fournisseurs de GNSS dans le cadre de l'[Union internationale des télécommunications \(UIT\)](#), pour faire en sorte que le spectre radioélectrique utilisé pour Galileo et d'autres GNSS soit disponible et protégé contre les interférences et veiller à ce que les règles mondiales régissant l'utilisation des radiofréquences n'affectent pas les GNSS. Cette activité s'exerce essentiellement au sein des groupes de travail de l'UIT (principalement le groupe de travail 4C de l'UIT-R) et à l'occasion des conférences mondiales des radiocommunications (CMR), qui ont lieu tous les quatre ans.

Enfin, l'action de l'UE porte également sur des aspects internationaux de la navigation par satellite dans le cadre d'autres organismes multilatéraux, notamment:

- [l'Organisation de l'aviation civile internationale \(OACI\)](#);
- [l'Organisation maritime internationale \(OMI\)](#).



## 4 VISION DU PNT DANS L'UE

Les sections précédentes décrivent l'écosystème PNT dans l'Union européenne, présentent l'importance de Galileo et d'EGNOS sur tous les marchés et expliquent comment de nouveaux services sont créés continuellement. Elles mettent également en évidence les limites et les menaces qui peuvent affecter les services PNT, ainsi que les technologies PNT émergentes qui répondent à certaines de ces préoccupations.

La présente section décrit la vision (à moyen terme) de l'écosystème PNT dans l'UE. Elle tient compte des grandes tendances en ce qui concerne les nouvelles constellations et nouveaux signaux, l'amélioration du matériel et des algorithmes de traitement, l'augmentation des interférences par radiofréquence et la connectivité mondiale.

Du point de vue des **segments de marché**, la tendance signalée dans le [rapport technologique 2020 sur les utilisateurs des GNSS](#), consistant en l'utilisation combinée de services PNT au niveau de l'utilisateur dans le cadre d'une approche de fusion de capteurs afin d'obtenir les performances requises, est généralement valable:

- le **marché de masse** utilisera du matériel à bas coût, mais exigera de plus en plus de services PNT haute précision (de précision centimétrique), en particulier le service haute précision gratuit de Galileo, pour des systèmes de transport intelligents, qui fusionnent les services GNSS et les complètent par un PPP, des données provenant de capteurs et la 5G. Le recours à des solutions bifréquences et multiconstellations sera généralisé;
- les **professionnels** exigeront des services haute précision multiconstellations et multifréquences (triple fréquence, par exemple) pleinement intégrés dans une gestion connectée et automatisée des flux de travail. L'intelligence artificielle se généralisera et révolutionnera ce segment de marché;
- la **sauvegarde de la vie et les applications critiques sur le plan de la responsabilité**, traditionnellement limitées par les réglementations et les normes, adopteront les nouvelles technologies à un rythme beaucoup plus lent. Si des travaux importants sont en cours pour mettre au point des solutions bifréquences et multiconstellations normalisées, les véritables difficultés seront liées à la normalisation de solutions résilientes et résistantes aux RFI. En outre, l'intégrité des services haute précision continuera d'être une priorité pour les avions (avec ou sans équipage) et les véhicules et navires autonomes;
- l'importance de la **synchronisation** augmentera de manière exponentielle, car les solutions de datation et de distribution horaire sont essentielles dans les secteurs des **infrastructures critiques**, des télécommunications, de l'énergie, de la finance ou des transports. La résilience de la synchronisation sera un impératif absolu et, pour compléter les services GNSS, il y aura un recours combiné aux services multifréquences et multiconstellations, aux services de datation fondés sur le RAIM, à la surveillance des interférences et à des services PNT de substitution.

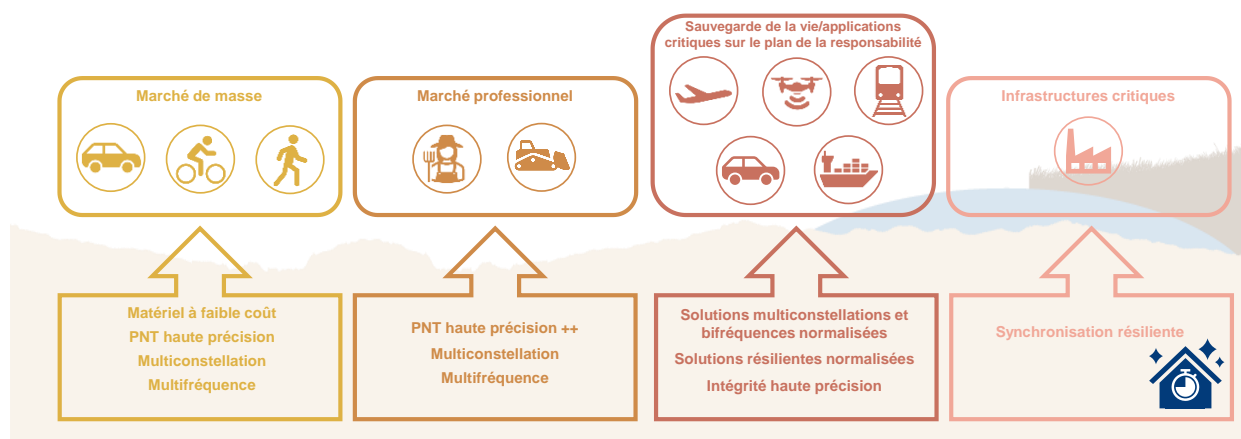


Illustration 19 — Vision du PNT dans l'UE par segment de marché

Du point de vue de l'**architecture des systèmes PNT**, l'écosystème PNT dans l'UE deviendra un [système de systèmes PNT](#), conjuguant services GNSS, services PNT conventionnels et services PNT émergents, tous étant synchronisés avec l'UTC(k):

1. les **GNSS européens** (Galileo et EGNOS) et le **système GPS** resteront la **clé de voûte des services PNT dans l'UE**. Les services des GNSS européens seront renforcés et améliorés grâce à de nouveaux services (haute précision, authentification, etc.), à des infrastructures améliorées (deuxième génération de Galileo, deuxième génération d'EGNOS) et à une capacité de surveillance ad hoc. La Commission européenne continuera d'œuvrer à l'adoption des services de Galileo et d'EGNOS au moyen de nouveaux règlements et de nouvelles normes et en finançant des projets d'applications innovantes.

Les **services GNSS haute précision**, tels que le service haute précision de Galileo, le RTK ou le PPP, seront **largement adoptés** pour les applications haute précision.

Des **solutions n'exploitant que les GNSS européens** pourraient par ailleurs être nécessaires pour des applications et des marchés spécifiques.

Enfin, la nouvelle connectivité spatiale sécurisée proposée par l'UE au moyen de la constellation de satellites [IRIS<sup>2</sup>](#) pourrait également servir de plateforme à des services PNT complémentaires, en plus de sa mission de communication principale;

2. des services **PNT émergents**, pouvant fournir des services PNT de substitution indépendants des GNSS, **continueront de se développer** et ils seront plus nombreux à être matures et disponibles sur le marché pour répondre aux besoins de secteurs spécifiques (par exemple, à l'intérieur des bâtiments) ou pour servir de solutions de repli par rapport aux services GNSS, notamment pour la synchronisation des infrastructures critiques. L'UE recommande de mettre au point des [solutions PNT de substitution transsectorielles](#).

En ce qui concerne la **synchronisation**, l'UE dispose d'une technologie mature pour fournir des services de datation très précis sans dépendre des GNSS. Le réseau d'[instituts nationaux de métrologie \(INM\)](#) jouera un rôle de premier plan dans la **génération du temps**, tandis que les entreprises européennes proposent des solutions commerciales pour la **distribution horaire**. L'UE devrait s'employer à développer pleinement l'écosystème de la synchronisation et garantir la fourniture de services de datation d'un bon rapport coût-efficacité et résilients aux utilisateurs concernés (tels que les infrastructures critiques).

Pour ce qui est du **positionnement / de la navigation**, le marché propose certaines solutions commerciales indépendantes des GNSS, mais il n'existe pas aujourd'hui de solutions matures émanant des entreprises de l'UE. L'UE s'efforcera de soutenir la mise en œuvre des directives CER et SRI 2 (voir section [3.4.1](#)) et d'**améliorer la résilience** de l'économie et de la société européennes. Elle devrait également envisager d'élaborer des [solutions qui lui sont propres](#) pour couvrir les cas d'utilisation nécessitant une **autonomie stratégique**;

3. malgré leurs inconvénients (coût, ancienneté du signal et conception du matériel, par exemple), les systèmes **PNT conventionnels** continueront d'être utilisés dans les marchés fortement réglementés, tels que les secteurs aéronautique et maritime, et leurs plans de [rationalisation](#) ne seront mis en œuvre que [lentement](#) (notamment en raison de la longue durée de vie des équipements), tandis qu'ils disparaîtront probablement dans les marchés non réglementés. Toutefois, certains systèmes (comme les systèmes de distribution du temps et de fréquences à ondes longues) peuvent conserver leur importance, étant donné qu'ils offrent une bonne résilience aux RFI, même si leurs performances sont limitées (précision à la msec).

En conclusion, le PNT étant essentiel au bon fonctionnement de l'économie et de la société dans l'UE, la **fourniture de services PNT RÉSILIENTS revêt une importance capitale**. Les services PNT fondés sur les GNSS doivent être diversifiés et fournis en associant tout un ensemble de technologies terrestres et spatiales, car aucune technologie isolée, pas même les GNSS, n'est à même d'offrir une résilience suffisante aux utilisateurs critiques des informations PNT. Pour être résilient, le PNT doit aussi s'accompagner d'un système de surveillance efficace, y compris pour les RFI dans les GNSS, et des procédures de coordination nécessaires entre les fournisseurs de GNSS, les agences de lutte contre les RFI et les pouvoirs publics.

Afin de garantir la résilience des services PNT, il y a lieu de transformer l'**écosystème PNT dans l'UE** en un **système de systèmes PNT**.

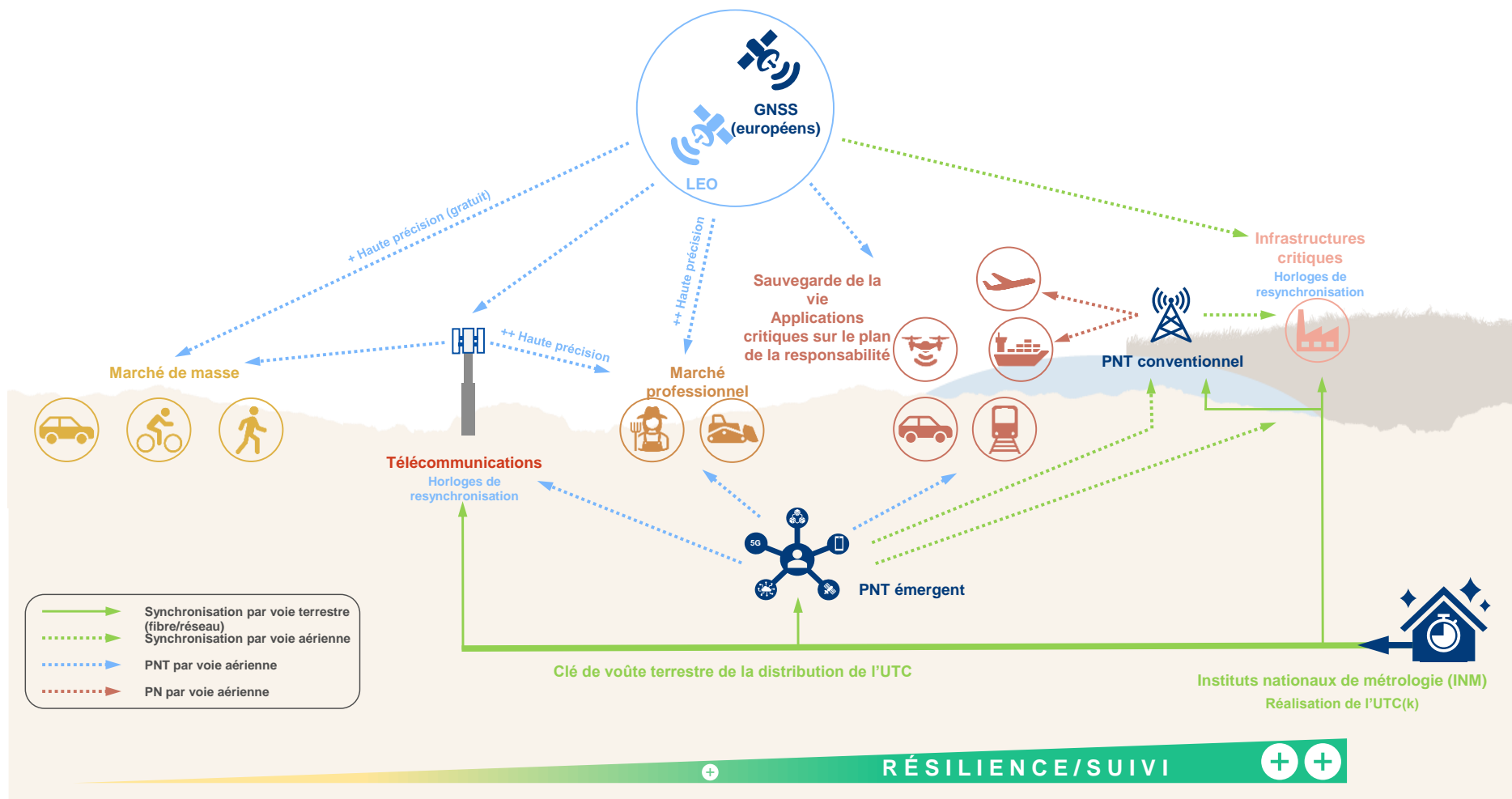


Illustration 20 — Vision du PNT dans l'UE

## 5 APPENDICE A: Systèmes PNT

### 5.1 Systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS)

Un système mondial de navigation par satellite (GNSS) est une **constellation de satellites transmettant des signaux depuis l'espace et fournissant des services de positionnement et de synchronisation aux récepteurs GNSS**.

Les **GNSS englobent des systèmes à couverture mondiale**, tels que le système européen Galileo, le système NAVSTAR GPS (Global Positioning System) des États-Unis, le système GLONASS (Globalnaïa Navigatsionnaïa Spoutnikovaïa Sistéma) de la Russie et le système BeiDou de la Chine, **et des systèmes à couverture régionale**, tels que NavIC (Navigation with Indian Constellation) en Inde, également connu sous le nom de «système indien de navigation régionale par satellite» (IRNSS), ou le QZSS au Japon, qui couvrent respectivement la région de l'Inde et la région Asie-Océanie. Les caractéristiques principales de ces GNSS sont présentées dans le [Tableau 6](#).

*Tableau 6 — Les constellations GNSS (source: rapport technologique sur les utilisateurs des GNSS)*

| Constellations GNSS            |                                |                  |                    |                          |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Paramètre                      | Galileo                        | GPS              | BeiDou             | GLONASS                  |
| Période orbitale (MEO)         | 14 h 04 min                    | 11 h 58 min      | 12 h 37 min        | 11 h 15 min              |
| Altitude orbitale (MEO)        | 23 222 km                      | 22 200 km        | 21 528 km          | 19 100 km                |
| Inclinaison (MEO)              | 56°                            | 55°              | 55°                | 64,8°                    |
| Nombre de plans d'orbite (MEO) | 3                              | 6                | 3                  | 3                        |
| Repère de référence            | GTFR                           | WGS-84           | CGCS 2000          | PZ-90                    |
| Temps de référence             | Temps du système Galileo (GST) | Temps GPS (GPST) | Temps BeiDou (BDT) | Temps GLONASS (GLONASST) |

Ces systèmes sont conçus pour être **compatibles et interopérables** et utilisent des signaux qui sont transmis sur les bandes de fréquences E5/L5, L2, E6 et E1/L1, comme le montre l'[Illustration 21](#).

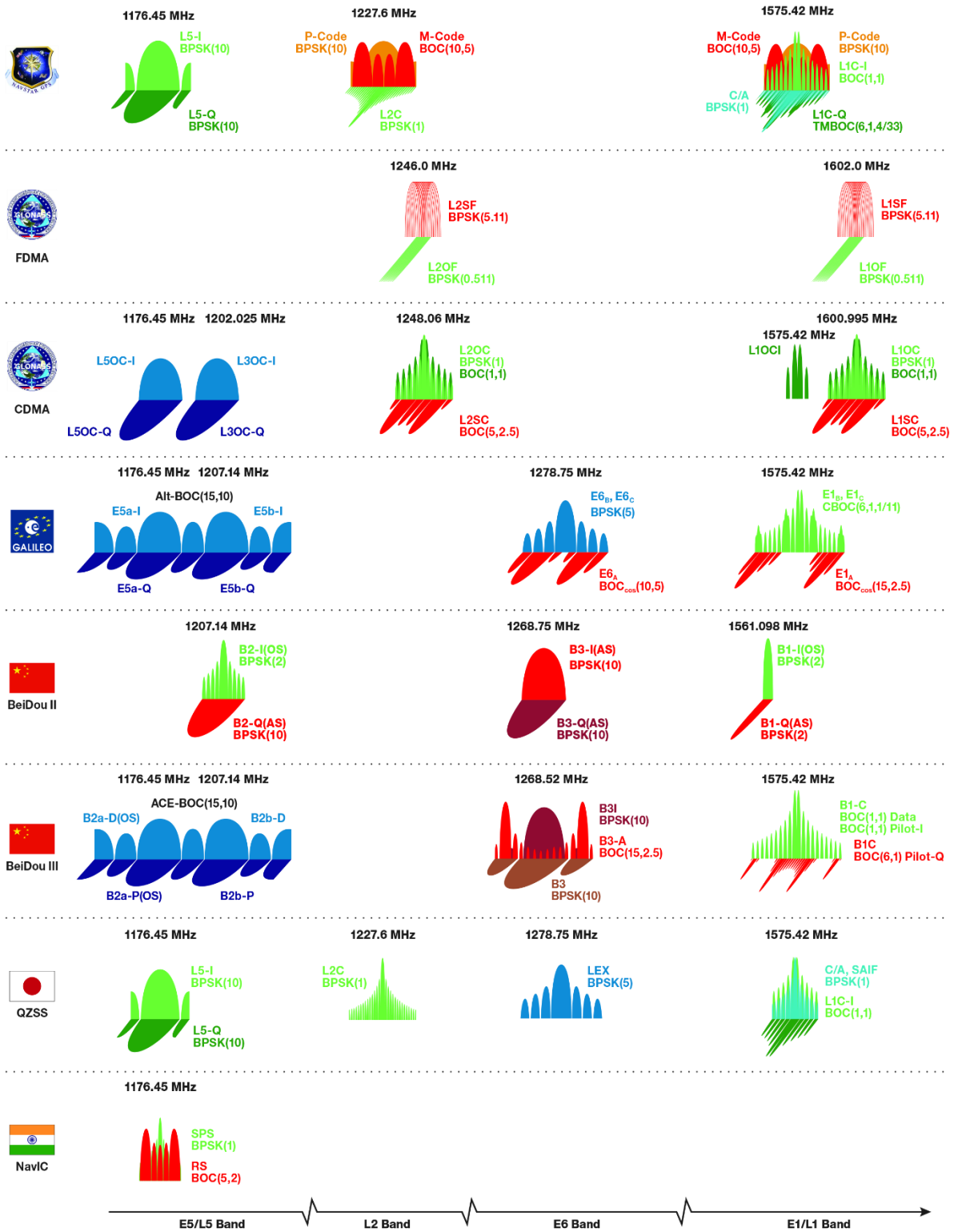


Illustration 21 — Fréquences utilisées par les GNSS (source: [Navipedia](#))

La précision de positionnement des GNSS se mesure généralement en mètres, Galileo offrant les meilleures performances, ainsi qu'il ressort de l'illustration 22 pour les GNSS à couverture mondiale durant le deuxième trimestre de 2022, et de l'illustration 23 pour la précision de mesure de distance en juin 2022 (GAL = Galileo, GLO = GLONASS et BDS = BeiDou).

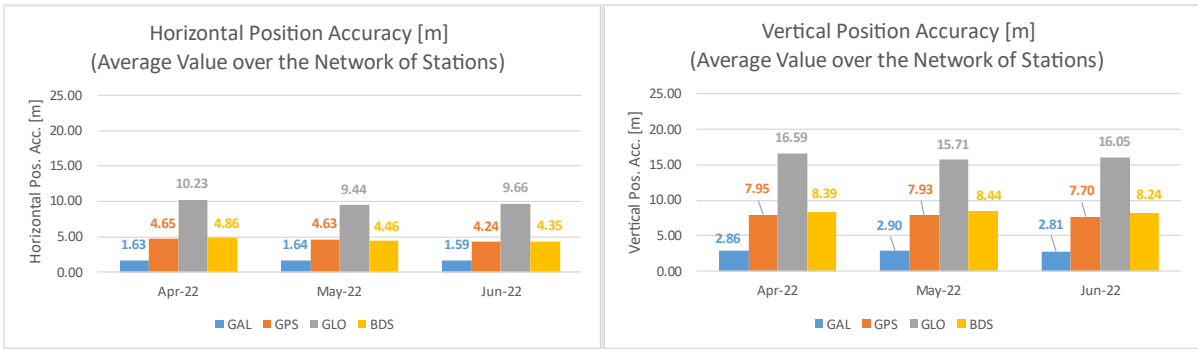


Illustration 22 — Précision horizontale et verticale des GNSS (source: EUSPA)

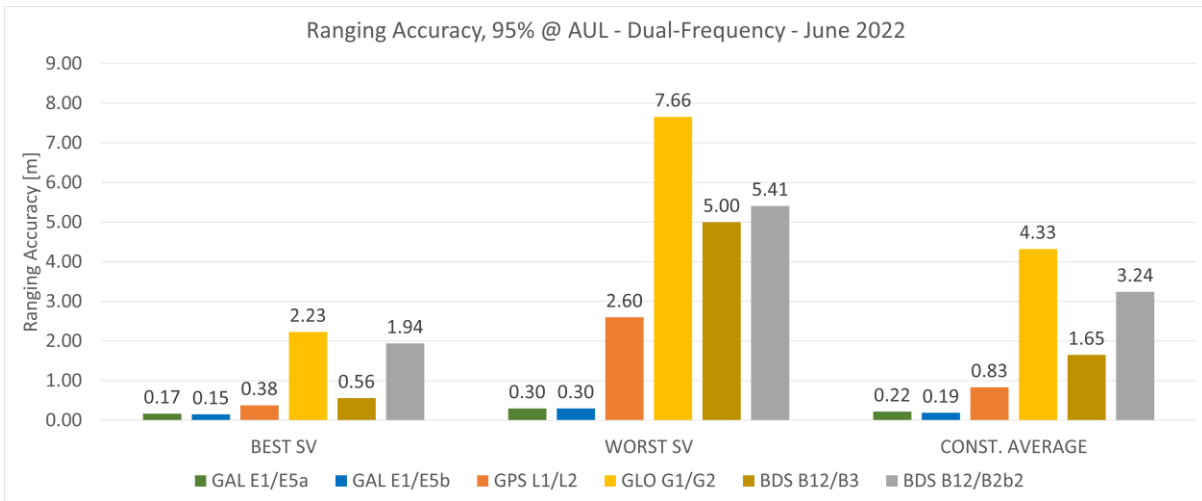


Illustration 23 — Précision de mesure de distance des GNSS (95 %) pour les utilisateurs bifrquences de Galileo, du système GPS, de GLONASS et de BeiDou



## 5.1.1 Systèmes de navigation par satellite à couverture mondiale

### 5.1.1.1 Galileo

Galileo est le système mondial de navigation par satellite européen sous **contrôle civil**, qui fournit depuis **décembre 2016** des services de positionnement très précis à l'échelle mondiale et un service de localisation de détresse dans la région européenne à des fins de recherche et de sauvetage (SAR). Il est interopérable avec les autres GNSS.

Galileo est constitué d'un segment spatial, d'un segment terrestre et d'un segment utilisateur.

Le segment spatial de Galileo est composé d'une constellation de satellites en orbite terrestre moyenne. La configuration de base de la constellation de Galileo est définie comme une constellation Walker 24/3/1: 24 satellites principaux en orbite terrestre moyenne disposés en 3 plans d'orbite, dont les nœuds ascendants sont uniformément répartis à des intervalles de 120°, avec une inclinaison de 56° par rapport à l'équateur. Chaque plan orbital contient 8 satellites répartis uniformément à l'intérieur du plan, à des intervalles de 45° de latitude. Le décalage angulaire entre des satellites de deux plans adjacents est de 15°. La constellation est complétée par des satellites de rechange qui peuvent être repositionnés à la place d'un satellite principal donné dans chaque plan orbital en fonction des besoins d'entretien ou de l'évolution du service.

Le segment terrestre de Galileo comprend les infrastructures de base suivantes:

- deux **centres de contrôle Galileo (GCC)**, situés à Oberpfaffenhofen en Allemagne et dans le Fucin en Italie, qui exercent des fonctions de «contrôle» soutenues par un *segment sol de contrôle (GCS)* et des fonctions de «mission» soutenues par un *segment sol de mission (GMS)* spécifique sur chaque site:
  - le segment sol de contrôle (GCS) gère la maintenance des véhicules spatiaux et l'entretien de la constellation au moyen d'un réseau mondial de stations de télémétrie, de suivi et de contrôle (TT&C). Cela inclut le contrôle et la surveillance des satellites et des charges utiles, des fonctions de planification et d'automatisation pour effectuer des opérations correctement et en toute sécurité, et un soutien aux opérations liées à la charge utile,
  - le segment sol de mission (GMS) détermine la composante «données de navigation et de synchronisation» des messages de navigation au moyen du réseau de stations de détection Galileo (GSS) et communique avec les satellites de Galileo par l'intermédiaire du réseau de stations de liaison montante Galileo (ULS);
- un réseau mondial de **stations de détection Galileo (GSS)**, qui collecte les mesures et données des signaux dans l'espace Galileo et les transmet aux centres de contrôle Galileo (GCC) en temps réel;
- un réseau mondial de **stations de liaison montante Galileo (ULS)**, qui distribue en liaison montante les données de la mission à la constellation de Galileo;
- un réseau mondial de **stations de télémétrie, de suivi et de contrôle (TT&C)**, qui collecte et transmet les données de télémétrie générées par les satellites de Galileo et distribue en liaison montante les commandes de contrôle nécessaires au maintien des satellites et de la constellation de Galileo dans des conditions d'utilisation nominales.

Une vue d'ensemble du segment terrestre de Galileo est incluse dans l'illustration 24, qui présente uniquement la fonctionnalité du segment terrestre de Galileo liée au service ouvert (OS).

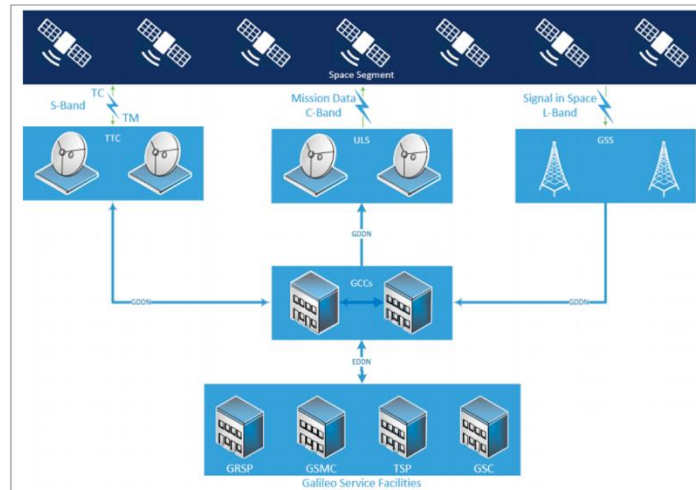


Illustration 24 — Schéma à haut niveau de l'architecture du segment terrestre de Galileo

Les **installations de services de Galileo** sont des éléments situés en dehors du périmètre des infrastructures de base de Galileo qui soutiennent la fourniture des services de Galileo.

Les installations de services qui contribuent à la fourniture du service ouvert Galileo sont les suivantes:

- le centre européen de services GNSS (GSC): il s'agit de l'interface entre la communauté des utilisateurs du service ouvert Galileo et le système Galileo;
- le fournisseur de services de référence géodésique (GRSP): cette entité aide les centres de contrôle Galileo à réaliser le repère de référence terrestre Galileo (GTRF) dans le respect du repère international de référence terrestre (ITRF);
- le fournisseur de services de datation (TSP): cette entité aide les centres de contrôle Galileo à réaliser le temps du système Galileo (GST) et à l'aligner sur le temps universel coordonné (UTC);
- le centre de surveillance de la sécurité Galileo (GSMC): cette installation est chargée de surveiller la sécurité du système;
- le fournisseur de services de données SAR/Galileo (SGDSP): cette entité est chargée de coordonner les opérations liées au service de recherche et de sauvetage/à Galileo;
- le centre de références Galileo (GRC): cette entité est chargée du suivi et de l'évaluation de la performance des services de Galileo et est totalement indépendante des infrastructures de base et des activités de Galileo.

Pour le service de recherche et de sauvetage de Galileo, des infrastructures supplémentaires sont nécessaires tant à bord des satellites qu'au sol:

- le **segment spatial SAR/Galileo** est composé de satellites de Galileo qui contiennent des répéteurs de recherche et de sauvetage (SARR). Ces répéteurs sont des transpondeurs transparents «en tuyau courbé» constitués du transpondeur SAR et des antennes de réception et de transmission SAR;
- le **segment terrestre SAR/Galileo** est composé de trois terminaux utilisateurs locaux en MEO (MEOLUT) situés à Maspalomas en Espagne, à Larnaca à Chypre et sur le Spitzberg en Norvège, qui fournissent des informations d'identification et de localisation des balises, et de cinq balises de référence (REFBE) situées à Maspalomas en Espagne, à Larnaca à Chypre, sur le Spitzberg en Norvège, à Toulouse en France et à Santa Maria au Portugal. Un quatrième MEOLUT sera déployé sur l'île française de la Réunion en 2023.

L'illustration ci-après donne une vue d'ensemble de la localisation des différents sites de Galileo.

## Galileo Sites and Ground Stations

- HQ: Headquarters
- GCC: Galileo Control Centre
- SGMC: Galileo Security Monitoring Centre
- SGSC: SAR/Galileo Service Centre
- GSC: GNSS Service Centre
- GRC: Galileo Reference Centre
- GILSC: Galileo Integrated Logistic Support Centre
- TTCCF: Telemetry, Tracking and Command
- ULS: Uplink Station
- GSS: Ground Sensor Station
- MEOLUT: Medium Altitude Earth Orbit Local User Terminal
- REFBE: Galileo/SAR Reference Beacons
- IOT: In-Orbit Testing station



Galileo Sites and Ground Stations status as of September 2021

Illustration 25 — Sites et stations terrestres de Galileo (source: [centre de services GNSS](#))

Le [segment utilisateur de Galileo](#) se compose de tous les récepteurs et appareils compatibles qui collectent les signaux Galileo, déterminent les pseudodistances (et d'autres paramètres observables) et résolvent les équations de navigation afin d'obtenir des coordonnées et de fournir une synchronisation précise.

#### 5.1.1.1.1 Services de Galileo

Les services de Galileo sont décrits à la section [3.2](#).

#### 5.1.1.1.2 Caractéristiques principales

Le [Tableau 7](#) et l'[Illustration 26](#) montrent les caractéristiques principales des signaux Galileo.

Tableau 7 — Caractéristiques principales des signaux Galileo

| E1                             |                 |                             |
|--------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| Signal                         | E1 OS           | E1 PRS                      |
| Fréquence (MHz)                | 1 575,42        | 1 575,42                    |
| Technique d'accès              | CDMA            | CDMA                        |
| Modulation                     | CBOC (6,1,1/11) | BOC <sub>cos</sub> (15,2.5) |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -157            |                             |
| E6                             |                 |                             |
| Signal                         | E6 CS           | E6 PRS                      |
| Fréquence (MHz)                | 1 278,75        | 1 278,75                    |
| Technique d'accès              | CDMA            | CDMA                        |
| Modulation                     | BPSK (5)        | BOC <sub>cos</sub> (10,5)   |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -155            |                             |
| E5                             |                 |                             |
| Signal                         | E5a             | E5b                         |
| Fréquence (MHz)                | 1 176,45        | 1 207,14                    |
| Technique d'accès              | CDMA            | CDMA                        |
| Modulation                     | AltBOC (15,10)  | AltBOC (15,10)              |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -155            |                             |

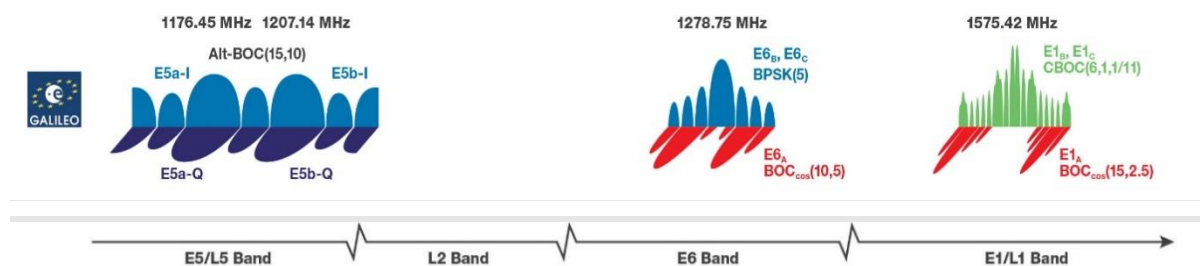


Illustration 26 — Signaux Galileo (source: [Navipedia](#))

### 5.1.1.1.3 Performance

Le [document définissant le service ouvert Galileo](#) spécifie les niveaux minimaux de performance (MPL) de ce service. Le [Tableau 8](#) montre les performances habituelles pour l'ensemble du système Galileo déployé.

Tableau 8 — Performance du service de Galileo en déploiement total

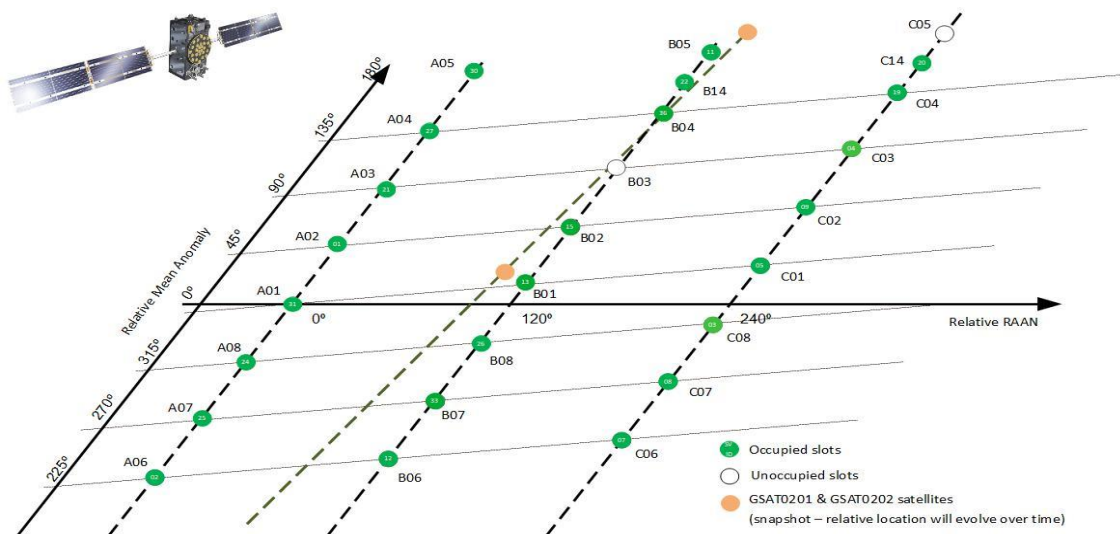
|   | Service ouvert Galileo (positionnement et synchronisation) |  |
|---|--|--|
|   | Monofréquence  | Bifréquence  |
| <b>Couverture</b>   | <b>Mondiale</b>  |  |
| <b>Précision (95 %)</b>   | Horizontale: 15 m  | Horizontale: 4 m   |
|   | Verticale: 35 m  | Verticale: 8 m   |
| <b>Disponibilité</b>  | 99,5 %   | 99,5 %   |
| <b>Précision de la synchronisation par rapport à l'UTC/au TAI</b> | 30 ns  | Précision de la synchronisation par rapport à l'UTC/au TAI |

De plus amples informations sur la performance du service ouvert ou d'autres services tels que le service de recherche et de sauvetage sont disponibles [dans le document définissant le service ouvert Galileo ou dans le document définissant le service de recherche et de sauvetage de Galileo](#).

### 5.1.1.1.4 Situation actuelle et plans de modernisation

À la fin de 2022, l'état du segment spatial de Galileo était le suivant:

- 28 satellites de première génération avaient été lancés: 26 satellites opérationnels pour la recherche et le sauvetage et 24 satellites opérationnels pour la navigation (1 en réserve);
- 10 satellites de première génération avaient été produits et étaient prêts à être lancés:
  - 4 satellites permettront la capacité opérationnelle complète en occupant tous les emplacements principaux + 1 satellite de réserve par plan à des fins de robustesse,
  - 6 satellites supplémentaires permettront de maintenir la constellation jusqu'à l'arrivée des satellites de deuxième génération.



### Illustration 27 — Segment spatial de Galileo (situation à la fin de 2022)

Les services fournis par la première génération de Galileo seront renforcés par la nouvelle génération de Galileo (la **deuxième génération de Galileo — G2G**) ainsi que par la fourniture de nouveaux services. Ces services sont explicitement définis dans l'actuel [règlement relatif au programme spatial de l'UE](#) et ont été décrits dans la section [3.2](#). L'illustration ci-dessous montre les différentes améliorations en matière de services qui résulteront de la deuxième génération de Galileo:



Illustration 28 — Améliorations des services grâce à la deuxième génération de Galileo

Les exigences de **mission** pour la deuxième génération de Galileo ont déjà été établies et ont été formalisées par la [décision d'exécution C\(2020\) 8968 de la Commission](#).

Ces services nouveaux et améliorés seront possibles grâce aux satellites de nouvelle génération et aux capacités améliorées du segment terrestre.

Les nouvelles technologies embarquées incluront la **propulsion électrique** en vue de propulser les satellites depuis l'orbite dans laquelle ils seront lancés jusqu'aux orbites opérationnelles finales, ce qui permettra de lancer deux satellites en même temps malgré l'augmentation de leur masse. Les **liaisons intersatellites** rendront les satellites moins dépendants des contacts provenant des installations au sol. Les satellites afficheront également des **signaux plus puissants**, une **charge utile plus flexible**, notamment une nouvelle antenne de navigation, des **horloges atomiques embarquées plus précises** et une **durée de vie plus longue**.

Le **segment terrestre sera amélioré** dans son ensemble, du matériel aux logiciels et aux liaisons de communication. Les algorithmes seront améliorés et un suivi supplémentaire sera mis en œuvre, ce qui permettra de renforcer les performances et la robustesse des services déjà fournis. Des fonctionnalités supplémentaires seront ajoutées pour permettre le contrôle des nouvelles capacités des satellites ainsi que la fourniture des nouveaux services.

De plus amples informations sur Galileo sont disponibles dans les [documents consacrés au programme Galileo](#).



### 5.1.1.2 GPS

Le système de positionnement mondial (GPS) est un système de positionnement, de navigation et de synchronisation appartenant au gouvernement des États-Unis et exploité par l'armée de l'air de ce pays. Il s'agit d'un système à double usage, fournissant des services aux utilisateurs civils et aux utilisateurs militaires. Le système GPS est constitué d'un segment spatial, d'un segment de contrôle et d'un segment utilisateur. Il transmet à partir d'une constellation de satellites plusieurs signaux de radiofréquence contenant des informations précises en matière de synchronisation et de localisation. L'association d'informations provenant d'au moins quatre satellites permet à l'utilisateur d'obtenir une estimation de sa position et de la date et de l'heure. **Le système GPS est devenu opérationnel en 1993.** Il fournit une couverture mondiale ininterrompue, dans toutes les conditions météorologiques.

Le **segment spatial GPS** est formé d'une constellation de satellites en orbite terrestre moyenne. Au moins 24 satellites sont nécessaires pour assurer une couverture mondiale, même si le nombre réel de satellites en orbite est généralement plus élevé, ce qui augmente les performances du système. Les satellites sont positionnés sur six plans d'orbite équidistants, selon une inclinaison de 55° et à une altitude de 20 200 kilomètres. Avec cette configuration de constellation, au moins quatre satellites GPS couvrent toujours chaque point de la surface de la Terre, ce qui est nécessaire pour obtenir les informations de positionnement.

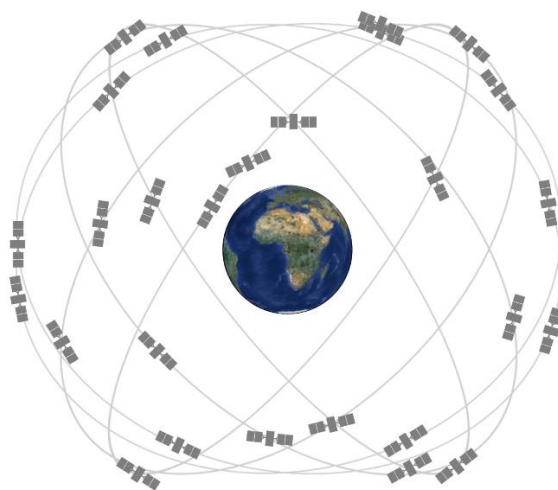


Illustration 29 — Constellation GPS (source: <http://www.gps.gov>)

Depuis le premier lancement en 1978, les États-Unis n'ont cessé d'améliorer les caractéristiques des satellites GPS. Chaque génération, ou bloc, de satellites transmet davantage de signaux, avec des codes améliorés, et utilise plus de fréquences que la génération précédente. Les satellites modernes affichent également de meilleures composantes et caractéristiques: amélioration des horloges atomiques, augmentation de la puissance, augmentation de la durée de vie prévue, etc. Il en résulte une amélioration des performances et de la précision pour les utilisateurs civils et militaires. Ce processus d'évolution se poursuivra à l'avenir.

La constellation GPS est composée d'un mélange de satellites anciens et nouveaux. Le tableau ci-après résume les caractéristiques des générations actuelle et futures des satellites GPS: le bloc IIA (2<sup>e</sup> génération, «Advanced»), le bloc IIR («Replenishment»), le bloc IIR-M («Modernised»), le bloc IIF («Follow-on»), et les GPS III et GPS III F («Follow-on»).

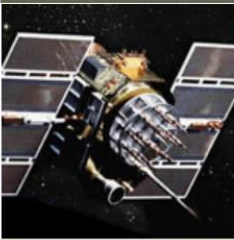
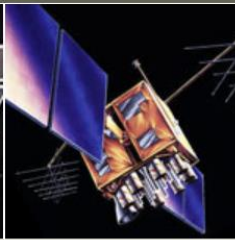
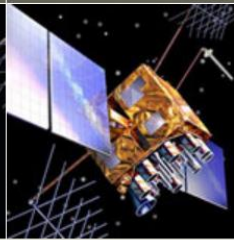
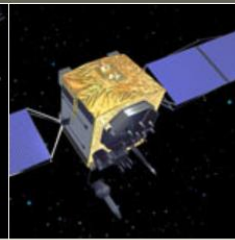
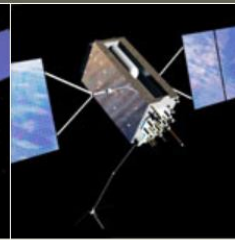
| LEGACY SATELLITES  |  | MODERNIZED SATELLITES   |  |   |
|--|--|---|--|---|
|   |   |    |    |    |
| BLOCK IIA  | BLOCK IIR  | BLOCK IIR-M   | BLOCK IIF  | GPS III/IIF   |
| 0 operational  | 7 operational  | 7 operational   | 12 operational   | 5 operational   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Coarse Acquisition (C/A) code on L1 frequency for civil users</li> <li>Precise P(Y) code on L1 &amp; L2 frequencies for military users</li> <li>7.5-year design lifespan</li> <li>Launched in 1990-1997</li> <li>Last one decommissioned in 2019</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>C/A code on L1</li> <li>P(Y) code on L1 &amp; L2</li> <li>On-board clock monitoring</li> <li>7.5-year design lifespan</li> <li>Launched in 1997-2004</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>All legacy signals</li> <li>2nd civil signal on L2 (L2C) <a href="#">LEARN MORE</a> →</li> <li>New military M code signals for enhanced jam resistance</li> <li>Flexible power levels for military signals</li> <li>7.5-year design lifespan</li> <li>Launched in 2005-2009</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>All Block IIR-M signals</li> <li>3rd civil signal on L5 frequency (L5) <a href="#">LEARN MORE</a> →</li> <li>Advanced atomic clocks</li> <li>Improved accuracy, signal strength, and quality</li> <li>12-year design lifespan</li> <li>Launched in 2010-2016</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>All Block IIF signals</li> <li>4th civil signal on L1 (L1C) <a href="#">LEARN MORE</a> →</li> <li>Enhanced signal reliability, accuracy, and integrity</li> <li>No Selective Availability <a href="#">LEARN MORE</a> →</li> <li>15-year design lifespan</li> <li>IIF: laser reflectors; search &amp; rescue payload</li> <li>First launch in 2018</li> </ul> |

Illustration 30 — Évolution des satellites GPS (source: <http://www.gps.gov>)

Au 26 juin 2022, la constellation GPS était constituée d'un total de 31 satellites opérationnels, auxquels il convient d'ajouter les satellites désactivés ou de réserve en orbite.

Le **segment de contrôle** se compose d'un réseau mondial d'installations au sol qui suivent, contrôlent et commandent les satellites GPS. Il surveille l'état de santé des satellites, résout les anomalies éventuelles, contrôle les orbites des satellites et les adapte si nécessaire, ajuste les horloges embarquées et, de manière générale, exécute toute tâche nécessaire au bon fonctionnement du système. Il se compose d'une station de contrôle maîtresse (la base Schriever de l'armée de l'air, dans le Colorado), d'une station de contrôle maîtresse suppléante (la base Vandenberg de l'armée de l'air, en Californie), de 16 stations de surveillance (réparties dans le monde entier) et de 11 antennes de commandement et de contrôle. Le segment de contrôle du système GPS est relié au réseau de contrôle des satellites de l'armée de l'air pour renforcer la flexibilité et la robustesse du suivi et du contrôle.

# GPS Control Segment

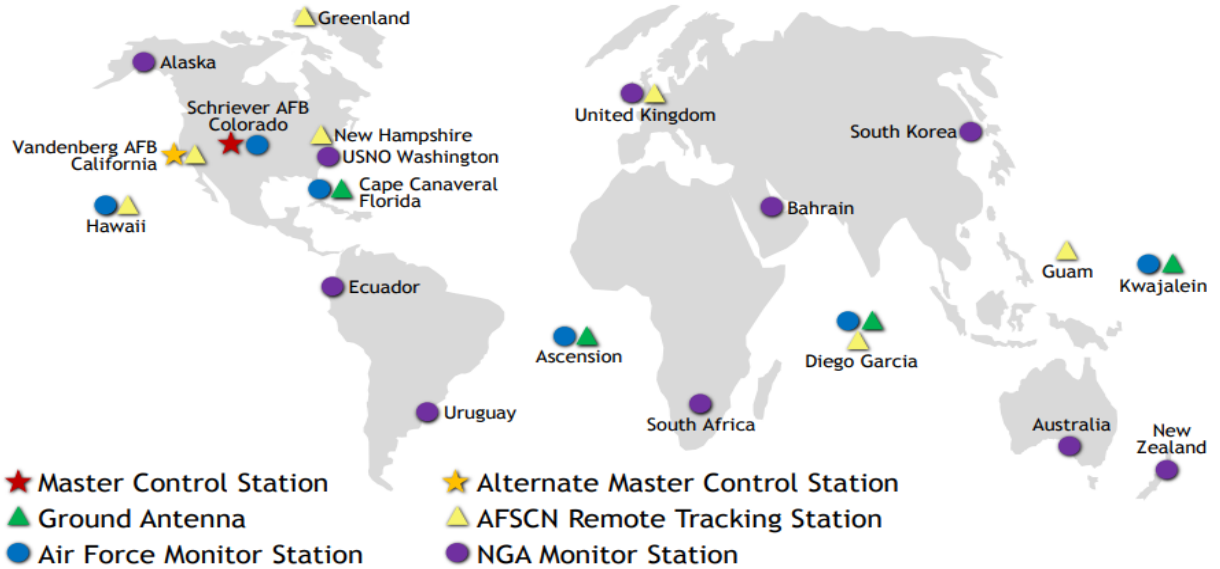


Illustration 31 — Segment de contrôle du système GPS (source: <http://www.gps.gov>)

Le **segment utilisateur** se compose des récepteurs utilisés pour recevoir et décoder les signaux GPS. Un récepteur donne à l'utilisateur ses informations de localisation tridimensionnelle ainsi qu'un signal de synchronisation très précis.

## 5.1.1.2.1 Services du système GPS

Le système GPS fournit deux types de [services de positionnement](#):

- le **service de positionnement standard (SPS) GPS**, sans frais directs pour les utilisateurs, qui est destiné à des fins civiles, commerciales et scientifiques. Le maintien de l'accès gratuit à ce service est la politique des États-Unis. Pour accéder au SPS GPS, les utilisateurs doivent simplement disposer d'un récepteur GPS compatible;
- le **service de positionnement précis (PPS) GPS**, limité au gouvernement et aux forces armées des États-Unis, ainsi qu'à une sélection d'alliés.

## 5.1.1.2.2 Caractéristiques principales

Le **volume des services** terrestres de la constellation GPS comprend la surface de la Terre jusqu'à une altitude de 3 000 kilomètres.

Le [Tableau 9](#) et l'[Illustration 32](#) montrent les caractéristiques principales des **signaux GPS**.

Tableau 9 — Caractéristiques principales des signaux GPS

| L1                             |          |                  |           |                |
|--------------------------------|----------|------------------|-----------|----------------|
| Signal                         | C/A      | L1C              | P(Y)      | M              |
| Fréquence (MHz)                | 1 575,42 | 1 575,42         | 1 575,42  | 1 575,42       |
| Technique d'accès              | CDMA     | CDMA             | CDMA      | CDMA           |
| Modulation                     | BPSK (1) | TMBOC (6,1,1/11) | BPSK (10) | BOCsine (10,5) |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -158,5   | -157             | -161,5    | sans objet     |

| L2                             |           |           |               |
|--------------------------------|-----------|-----------|---------------|
| Signal                         | L2 C      | P(Y)      | M             |
| Fréquence (MHz)                | 1 227,6   | 1 227,6   | 1 227,6       |
| Technique d'accès              | CDMA      | CDMA      | CDMA          |
| Modulation                     | BPSK (1)  | BPSK (10) | BOCsin (10,5) |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -161,5    | -160      | sans objet    |
| L5                             |           |           |               |
| Signal                         | L5        |           |               |
| Fréquence (MHz)                | 1 176,45  |           |               |
| Technique d'accès              | CDMA      |           |               |
| Modulation                     | BPSK (10) |           |               |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -157,9    |           |               |

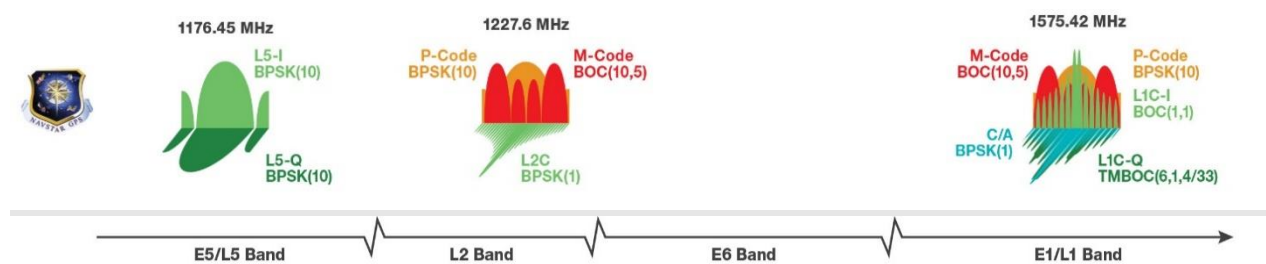


Illustration 32 — Signaux GPS (source: [Navipedia](#))

Les erreurs de positionnement et de synchronisation que les utilisateurs connaîtront dépendent des caractéristiques des signaux transmis par les satellites GPS, de leur propagation et des performances du récepteur utilisé. Le [Tableau 10](#) montre les **normes de précision en matière de positionnement et de synchronisation du SPS GPS** dans des conditions d'utilisation représentatives.

Tableau 10 — Normes de précision en matière de positionnement et de synchronisation du SPS GPS

|  |   |
|--|---|
| <b>Précision du positionnement moyen dans le monde:</b><br><b>erreur horizontale (95 %) ≤ 9 m</b><br><b>erreur verticale (95 %) ≤ 15 m</b> | Norme fondée sur un intervalle de mesure de 24 heures représenté par une moyenne pour tous les points du volume de services |
| <b>Précision du positionnement le moins précis:</b><br><b>erreur horizontale (95 %) ≤ 17 m</b><br><b>erreur verticale (95 %) ≤ 37 m</b>    | Norme fondée sur un intervalle de mesure de 24 heures pour tout point du volume de services                                 |
| <b>Précision du transfert du temps:</b><br><b>erreur de transfert du temps (95 %) ≤ 40 ns (SIS uniquement)</b>                             | Norme fondée sur un intervalle de mesure de 24 heures représenté par une moyenne pour tous les points du volume de services |

Le [Tableau 11](#) montre les **spécifications du SPS GPS en matière de disponibilité, d'intégrité et de continuité**.

*Tableau 11 — Spécifications du SPS GPS*

|                      |                                 |
|----------------------|---------------------------------|
| <b>Disponibilité</b> | 99 %                            |
| <b>Intégrité</b>     | $\geq 1 - 1 \times 10^{-5} / h$ |
| <b>Continuité</b>    | $\geq 0,9998 / h$               |

Pour exploiter les signaux GPS, les utilisateurs doivent simplement disposer d'un récepteur compatible. Dès lors, le système GPS peut être utilisé par un nombre illimité d'utilisateurs en même temps.

#### *5.1.1.2.3 Performance*

Le gouvernement des États-Unis s'est engagé à mettre le système GPS à la disposition de la communauté civile selon les niveaux de performance spécifiés dans le document [Normes de performance du service de positionnement standard \(SPS\) GPS](#).

Une [analyse des performances du SPS GPS en 2020](#), commandée par la «Force spatiale» des États-Unis, conclut que «toutes les exigences des normes de performance du SPS examinées dans le présent rapport ont été respectées en 2020». Les exigences évaluées concernaient notamment la précision, l'intégrité, la continuité et la disponibilité des signaux dans l'espace (SIS) du système GPS, ainsi que la précision du positionnement et du transfert du temps.

#### *5.1.1.2.4 Situation actuelle et plans de modernisation*

Le programme de modernisation du GPS est un effort continu de plusieurs milliards de dollars qui vise à améliorer les fonctionnalités et les performances globales de ce système. Il prévoit par exemple de nouveaux signaux GPS à usage civil et militaire.

La modernisation du [segment spatial](#) est présentée dans l'[Illustration 30](#).

La modernisation du [segment de contrôle](#) comprend les améliorations nécessaires pour commander et contrôler les nouveaux satellites GPS et pour renforcer la cybersécurité. Les améliorations en cours sont les suivantes:

- [OCX:système de contrôle opérationnel de nouvelle génération](#);
- [Cops:opérations d'urgence GPS III](#);
- [MCEU:utilisation anticipée du M-Code](#).

L'un des principaux axes du programme de modernisation du GPS est l'ajout de [nouveaux signaux de navigation](#) à la constellation de satellites. Le gouvernement est en train de déployer trois [nouveaux signaux](#) conçus pour un usage civil: L2C, L5 et L1C. Le signal civil actuel, appelé «L1 C/A» ou «C/A sur la bande L1», continuera à diffuser, pour un total de quatre signaux GPS à usage civil. Les utilisateurs doivent mettre à niveau leur matériel pour bénéficier des nouveaux signaux. Les nouveaux signaux civils sont introduits progressivement, au fur et à mesure que l'armée de l'air lance de nouveaux satellites GPS pour remplacer les anciens. La plupart des nouveaux signaux seront d'une utilité limitée tant qu'ils ne seront pas diffusés par 18 à 24 satellites.

Le programme de modernisation du GPS ajoute de nouveaux signaux civils à la constellation de ce système. Les nouveaux signaux utilisent un format modernisé de [message de navigation civile \(CNAV\)](#), plus souple que l'ancien message de navigation (LNAV) sur le signal civil original (code C/A). Le format CNAV possède également des caractéristiques modernes telles que la correction d'erreur directe. Ce format est pleinement défini dans les [spécifications d'interface](#) pour les signaux GPS L2C, L5 et L1C.

### 5.1.1.3 BeiDou

BeiDou est un système mondial de navigation par satellite détenu et développé par les autorités chinoises. Il s'agit d'un système à double usage, répondant aux besoins des utilisateurs tant civils que gouvernementaux, y compris militaires.

Le **segment spatial** de BeiDou, présenté dans l'[Illustration 33](#), est conçu selon une composition de cinq satellites géostationnaires, de trois satellites géostationnaires inclinés (IGSO) et de 27 satellites en orbite terrestre moyenne (MEO). Les satellites géostationnaires sont situés à des longitudes de 58,75° E, de 80,0° E, de 110,5° E, de 140,0° E et de 160,0° E. Les satellites IGSO sont équidistants sur une orbite d'une altitude de 36 000 kilomètres, à une inclinaison de 55° et à un point d'intersection sur une longitude de 118,0° E. Les satellites en MEO sont équidistants sur des orbites circulaires sur trois plans d'orbite, à une altitude de 21 500 kilomètres et à une inclinaison de 55°.



Le **segment terrestre** de BeiDou se compose d'une station de contrôle, de stations de liaison montante et d'un réseau de stations de surveillance. Les stations de surveillance vérifient la qualité des signaux de navigation et l'état des satellites et transmettent ces informations au centre de contrôle. Le centre de contrôle traite ces informations, génère le nouveau message de navigation et produit les commandes nécessaires au bon fonctionnement des satellites. Les stations de liaison montante transmettent ces informations aux satellites.

*Illustration 33 — Constellation de BeiDou*

#### 5.1.1.3.1 Services de BeiDou

BeiDou proposera deux types de services:

- les **services civils BeiDou**, à l'accès gratuit et illimité. Les autorités chinoises entendent maintenir cet accès gratuit. Pour accéder aux services civils BeiDou, les utilisateurs doivent simplement disposer d'un récepteur BeiDou compatible;
- les **services restreints BeiDou**, limités aux autorités chinoises.

#### 5.1.1.3.2 Caractéristiques principales

BeiDou fournit des services de positionnement, de navigation et de synchronisation sur toute la surface de la Terre, dans toutes les conditions météorologiques. L'[Illustration 33](#) et l'[Illustration 34](#) montrent les caractéristiques principales des signaux BeiDou.

*Tableau 12 — Caractéristiques principales des signaux BeiDou*

| B1                |           |           |                 |            |
|-------------------|-----------|-----------|-----------------|------------|
| Signal            | B1-I(OS)  | B1-Q(AS)  | B1-C            | B1         |
| Fréquence (MHz)   | 1 561,098 | 1 561,098 | 1 575,42        | 1 575,42   |
| Technique d'accès | CDMA      | CDMA      | CDMA            | CDMA       |
| Modulation        | BPSK (2)  | BPSK (2)  | MBOC (6,1,1/11) | BOC (14,2) |

B3



|                   |           |           |                |                |
|-------------------|-----------|-----------|----------------|----------------|
| Signal            | B3-I(AS)  | B3-Q(AS)  | B3-A(AS)       | B3(AS)         |
| Fréquence (MHz)   | 1 268,52  | 1 268,52  | 1 268,52       | 1 268,52       |
| Technique d'accès | CDMA      | CDMA      | CDMA           | CDMA           |
| Modulation        | BPSK (10) | BPSK (10) | BOC (15,2.5)   | BPSK (10)      |
| <b>B2</b>         |           |           |                |                |
| Signal            | B2-I(OS)  | B2-Q(AS)  | B2a            | B2b            |
| Fréquence (MHz)   | 1 207,14  | 1 207,14  | 1 176,46       | 1 207,14       |
| Technique d'accès | CDMA      | CDMA      | CDMA           | CDMA           |
| Modulation        | BPSK (2)  | BPSK (10) | AltBOC (15,10) | AltBOC (15,10) |

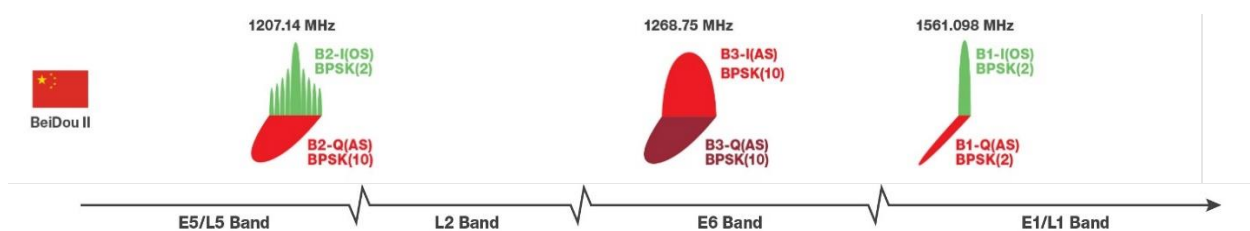


Illustration 34 — Signaux BeiDou (source: [Navipedia](#))

### 5.1.1.3.3 Performance

Le Bureau chinois de navigation par satellite a publié en 2013 les «normes de performance du service ouvert du système de navigation par satellite BeiDou». Le [Tableau 13](#) en reproduit les valeurs pour la précision en matière de position, de vitesse et de temps.

Tableau 13 — Performance de BeiDou

|  |           |  |
|--|-----------|--|
| <b>Précision horizontale (95 %)</b>    | ≤ 10 m    | Erreur statistique en matière de position/vitesse/temps pour tout point du volume de services sur un intervalle de 24 heures |
| <b>Précision verticale (95 %)</b>      | ≤ 10 m    |  |
| <b>Précision de la vitesse (95 %)</b>  | ≤ 0,2 m/s |  |
| <b>Précision du temps (95 %)</b>       | ≤ 50 ns   |  |
| <b>Disponibilité du positionnement</b> | ≥ 0,95    | Tout point du volume de services sur un intervalle de 24 heures  |

Pour exploiter les signaux BeiDou, les utilisateurs doivent disposer d'un récepteur compatible. BeiDou peut être utilisé par un nombre illimité d'utilisateurs en même temps.

### 5.1.1.3.4 Situation actuelle et plans de modernisation

La [constellation complète](#) de BeiDou 3 se compose de 24 satellites en MEO, de 3 satellites IGSO et de 3 satellites géostationnaires. Elle a été achevée en 2020. En janvier 2022, 44 satellites de la constellation étaient opérationnels: 7 satellites géostationnaires, 10 satellites IGSO à une inclinaison de 55° et 27 satellites en MEO. En outre, 5 satellites (2 en MEO, 1 géostationnaire et 2 IGSO) sont en cours d'essai ou de mise en service.

### 5.1.1.4 GLONASS

GLONASS est un système de radionavigation par satellite détenu et exploité par la Russie. Il s'agit d'un système à double usage, fournissant des services aux utilisateurs civils et aux utilisateurs militaires.

GLONASS est constitué d'un segment spatial, d'un segment de contrôle et d'un segment utilisateur. Au moins 24 satellites sont nécessaires pour assurer une couverture mondiale. Les satellites sont positionnés sur trois plans d'orbite inclinés à 63,8°, à une altitude de 19 140 kilomètres. Cette configuration garantit une couverture mondiale pour toute la surface de la Terre et est adaptée aux hautes latitudes de la Russie.

GLONASS était devenu **pleinement opérationnel** (24 satellites opérationnels) **en 1996** mais, en 2002, sa constellation ne comptait plus que sept satellites, dont six seulement étaient disponibles pendant les opérations d'entretien. Une constellation complète de 24 satellites a de nouveau été réalisée le 8 décembre 2011, et ce nombre a été plus ou moins maintenu par la suite (voir section [5.1.1.4.4](#) pour le statut de la constellation).

Le segment de contrôle de GLONASS se compose d'un réseau de stations de surveillance, d'antennes de communication de liaison montante et de liaison descendante, de stations de suivi laser et d'un centre de contrôle du système. Le segment de contrôle surveille l'état et la performance des satellites et résout les anomalies potentielles ([documents relatifs au système GLONASS](#)).

#### 5.1.1.4.1 Services de GLONASS

GLONASS fournit deux types de services:

- les **services civils GLONASS**, à l'accès gratuit et illimité. Les autorités russes entendent maintenir cet accès gratuit. Pour accéder aux services civils GLONASS, les utilisateurs doivent simplement disposer d'un récepteur GLONASS compatible;
- les **services restreints GLONASS**, limités au gouvernement et aux forces armées russes.

#### 5.1.1.4.2 Caractéristiques principales

GLONASS fournit des services de positionnement, de navigation et de synchronisation sur toute la surface de la Terre, dans toutes les conditions météorologiques. Le [Tableau 14](#) et l'[Illustration 35](#) montrent les caractéristiques principales des signaux GLONASS.

Tableau 14 — Caractéristiques principales des signaux GLONASS

| L1                             |                           |                           |           |             |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-------------|
| Signal                         | C/A                       | P                         | L1 OC     | L1 OCM      |
| Fréquence (MHz)                | de 1 598,0625 à 1 605,375 | de 1 598,0625 à 1 605,375 | 1 600,995 | 1 600,995   |
| Technique d'accès              | FDMA                      | FDMA                      | CDMA      | CDMA        |
| Modulation                     | BPSK (0.511)              | BPSK (5.11)               | BPSK (1)  | BOC (5,2.5) |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -161                      | sans objet                |           |             |
| L2                             |                           |                           |           |             |
| Signal                         | C/A                       | P                         | L2 OC     | L2 OCM      |
| Fréquence (MHz)                | de 1 242,9375 à 1 248,625 | de 1 242,9375 à 1 248,625 | 1248,06   | 1248,06     |
| Technique d'accès              | FDMA                      | FDMA                      | CDMA      | CDMA        |
| Modulation                     | BPSK (0.511)              | BPSK (5.11)               | BPSK (1)  | BOC (5,2.5) |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -167                      | sans objet                |           |             |
| L3                             |                           |                           |           |             |

|                   |           |
|-------------------|-----------|
| Signal            | L3 OC     |
| Fréquence (MHz)   | 1 202,025 |
| Technique d'accès | CDMA      |
| Modulation        | QPSK (10) |
| <b>L5</b>         |           |
| Signal            | L5 OC     |
| Fréquence (MHz)   | 1 176,45  |
| Technique d'accès | CDMA      |
| Modulation        | QPSK (10) |

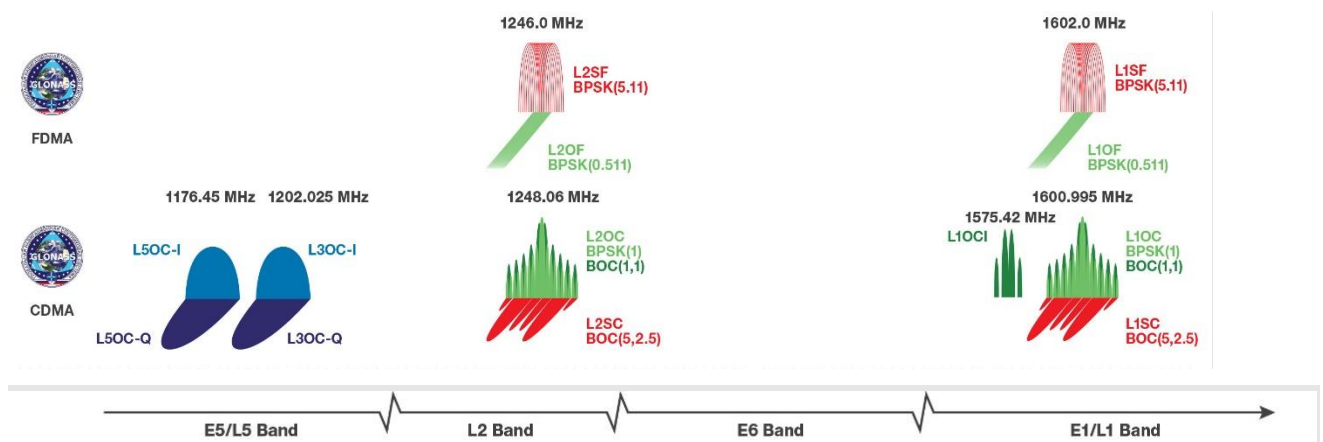


Illustration 35 — Signaux GLONASS (source: [Navipedia](#))

### 5.1.1.4.3 Performance

Les performances du système de constellation et des utilisateurs de GLONASS sont publiées sur le [site web officiel de GLONASS](#). L'illustration 36 et l'illustration 37 montrent la précision pour les utilisateurs des signaux dans l'espace et les erreurs en matière de mesure de distance des signaux dans l'espace en août 2022.

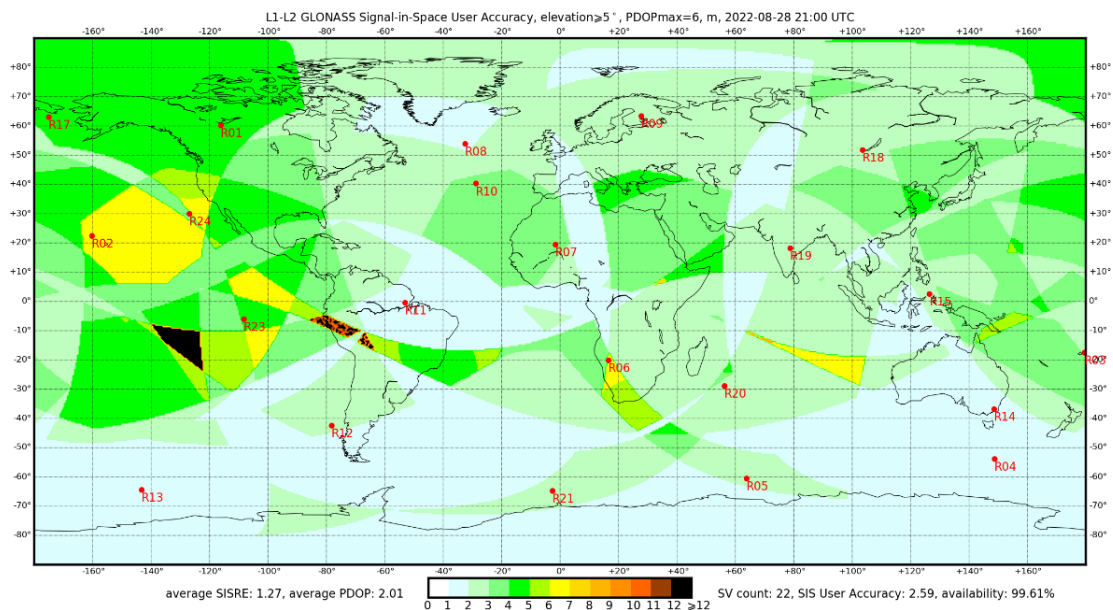


Illustration 36 — Performance de GLONASS concernant la précision pour les utilisateurs des signaux dans l'espace

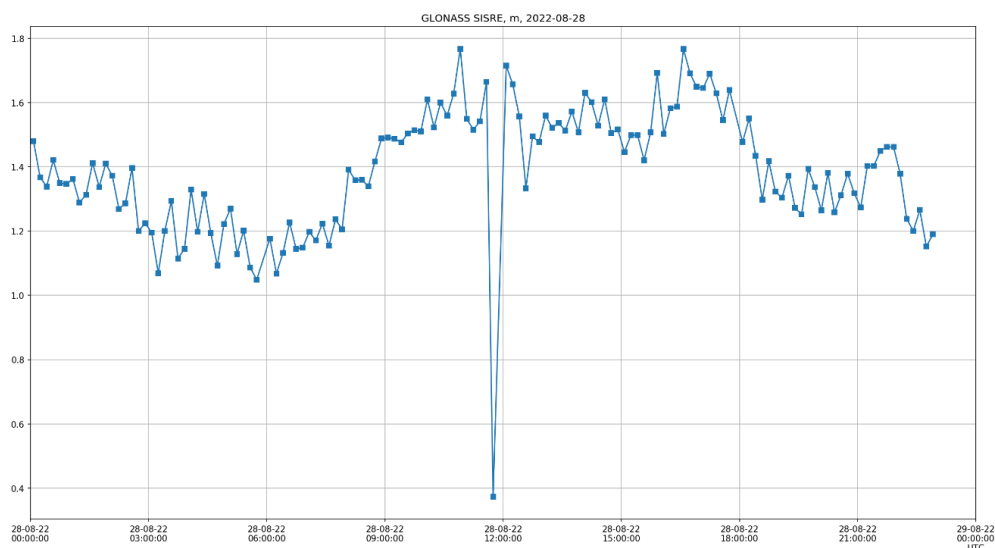


Illustration 37 — Performance de GLONASS concernant les erreurs en matière de mesure de distance des signaux dans l'espace

Pour exploiter les signaux GLONASS, les utilisateurs doivent disposer d'un récepteur compatible. GLONASS peut être utilisé par un nombre illimité d'utilisateurs en même temps.

#### 5.1.1.4.4 Situation actuelle et plans de modernisation

En mai 2022, GLONASS comptait 22 [satellites opérationnels](#) en orbite et 3 en phase d'entretien. Tous les satellites appartiennent au bloc GLONASS-M, à l'exception de deux, qui appartiennent au bloc GLONASS-K. Depuis 2019, la Russie prévoit de reconstituer la constellation avec des satellites modernisés GLONASS-K1 et GLONASS-K2. Les L1 et L2 en FDMA ont atteint la capacité opérationnelle complète. La capacité opérationnelle complète devrait être atteinte en 2022 pour le L3 en CDMA, en 2025 pour le L2 en CDMA et vers 2030 pour le L1 en CDMA ([documents officiel relatifs au système GLONASS](#)).

De plus amples informations sur l'état du système et sa modernisation sont disponibles sur le [site web de GLONASS](#).

## 5.1.2 Systèmes de navigation par satellite à couverture régionale

### 5.1.2.1 QZSS

Le système satellitaire Quasi-Zénith (QZSS), également connu sous le nom de «Michibiki», est un système de renforcement satellitaire régional développé par le **Japon** pour améliorer les performances des utilisateurs du système GPS dans la région Asie-Océanie. Il se compose de quatre satellites opérationnels et d'un satellite de réserve dont la couverture est centrée sur le Japon. Les **quatre premiers satellites** étaient disponibles en janvier 2018 et sont devenus **opérationnels en novembre 2018**.

Le QZSS utilise un satellite géostationnaire et trois satellites en orbite Tundra (orbite géosynchrone très inclinée et légèrement elliptique). Chaque orbite est séparée de 120° des deux autres. En raison de cette inclinaison, les satellites ne sont pas géostationnaires; ils ne restent pas au même endroit dans le ciel. Au lieu de cela, ils couvrent le sol selon des parcours asymétriques (analemmes), qui garantissent qu'un satellite survole toujours presque directement (à une élévation de 60° ou plus) le Japon. De plus amples informations sont disponibles sur le [site web du QZSS](#).

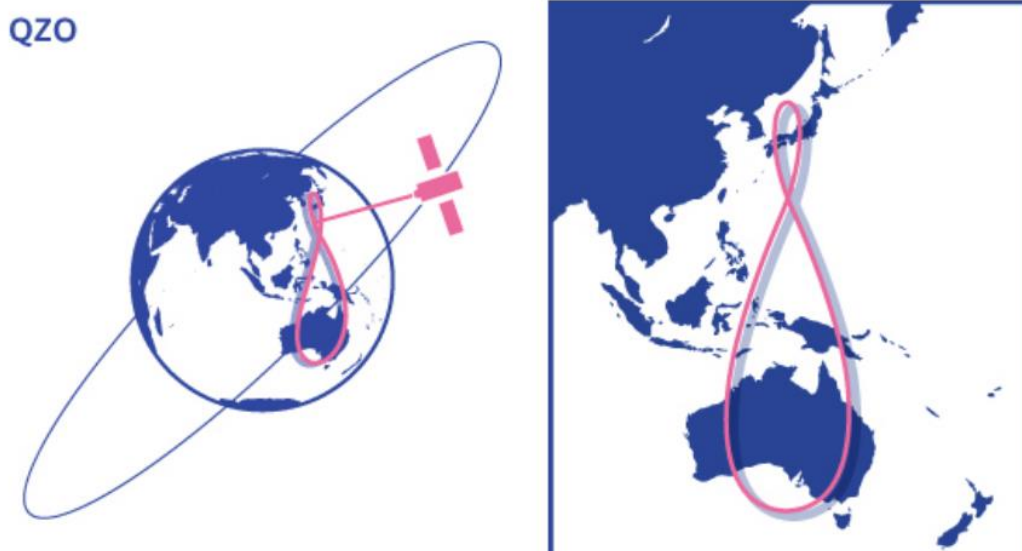


Illustration 38 — Constellation du QZSS (source: [secrétariat de la politique spatiale nationale du QZSS](#))

#### 5.1.2.1.1 Services du QZSS

Le QZSS fournit trois types de services publics:

- un **service PNT**, qui complète les signaux du système GPS par des signaux de mesure de distance supplémentaires. Ce service est diffusé sur les bandes L1C/A, L1C, L2C et L5C, tout comme le système GPS;
- un **service de renforcement submétrique (SLAS)**, qui complète les GNSS pour le système GPS et est interopérable avec les autres systèmes de renforcement satellitaire (SBAS) du système GPS. Ce service est transmis sur la fréquence L1;
- un **service de renforcement centimétrique (CLAS)**, qui assure un positionnement haute précision compatible avec le service haute précision E6 de Galileo. Ce service est diffusé sur la bande L6 ou «LEX» (pour «L expérimentale»).

### 5.1.2.1.2 Caractéristiques principales

Les satellites du QZSS transmettent des **signaux compatibles avec le signal L1C/A du système GPS**, ainsi qu’avec ses **signaux** L1C, L2C et L5 modernisés. En comparaison avec l’utilisation du seul système GPS, la conjugaison des services du GPS et du QZSS permet d’améliorer les performances de positionnement grâce aux données de correction de la mesure de distance des signaux L1-SAIF et LEX augmentant les performances. Elle renforce également la fiabilité grâce à la surveillance des défaillances et aux notifications des données de santé du système.

Le [Tableau 15](#) et l’[Illustration 39](#) montrent les caractéristiques principales des signaux QZSS.

Tableau 15 — Caractéristiques principales des signaux QZSS

| L1                             |                                     |          |                                       |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------|---------------------------------------|
| Signal                         | L1 C/A                              | L1 C/B   | L1C                                   |
| Fréquence (MHz)                | 1 575,42                            | 1 575,42 | 1 575,42                              |
| Technique d’accès              | CDMA                                | CDMA     | CDMA                                  |
| Modulation                     | BPSK (1)                            | BOC      | BOC/TBOC                              |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -158,5                              | -158,5   | L1CD: -163,0 dBW<br>L1CP: -158,25 dBW |
| L2                             |                                     |          |                                       |
| Signal                         | L2 C                                |          |                                       |
| Fréquence (MHz)                | 1 227,6                             |          |                                       |
| Technique d’accès              | CDMA                                |          |                                       |
| Modulation                     | BPSK                                |          |                                       |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -160,0 (bloc I)<br>-157,0 (bloc II) |          |                                       |
| L5                             |                                     |          |                                       |
| Signal                         | L5                                  |          |                                       |
| Fréquence (MHz)                | 1 176,45                            |          |                                       |
| Technique d’accès              | CDMA                                |          |                                       |
| Modulation                     | QPSK                                |          |                                       |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -157,9 (bloc I)<br>-157,0 (bloc II) |          |                                       |
| L6                             |                                     |          |                                       |
| Signal                         | L6                                  |          |                                       |
| Fréquence (MHz)                | 1 278,75                            |          |                                       |
| Technique d’accès              | CDMA                                |          |                                       |
| Modulation                     | BPSK                                |          |                                       |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -155,7 (bloc I)<br>-156,8 (bloc II) |          |                                       |



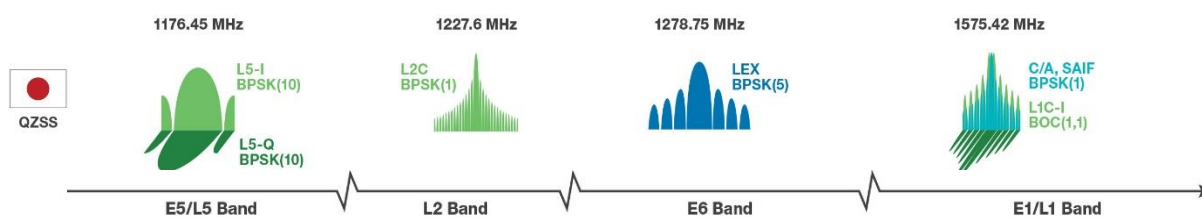


Illustration 39 — Signaux QZSS (source: [Navipedia](#))

Pour exploiter les signaux QZSS, les utilisateurs doivent simplement disposer d'un récepteur compatible. Le QZSS peut être utilisé par un nombre illimité d'utilisateurs en même temps.

#### 5.1.2.1.3 Performance

Les performances du QZSS sont décrites dans les rapports techniques disponibles sur le [site du Bureau du Cabinet du Japon](#). La précision des signaux dans l'espace des satellites du QZSS en 2021 est présentée dans l'illustration 40.

| Satellite          | Message NAV | Précision des signaux dans l'espace (95 %) [m] |      |      |         |      |           |
|--------------------|-------------|--|------|------|---------|------|-----------|
|                    |             | Avril  | Mai  | Juin | Juillet | Août | Septembre |
| SVN001<br>(PRN193) | LNAV        | 0,53   | 0,55 | 0,76 | 0,81    | 0,57 | 2,75      |
|                    | CNAV        | 0,52   | 0,55 | 0,72 | 0,78    | 0,57 | 2,73      |
| SVN002<br>(PRN194) | LNAV        | 0,88   | 1,08 | 1,06 | 0,71    | 0,60 | 0,47      |
|                    | CNAV        | 0,88   | 1,12 | 1,08 | 0,71    | 0,59 | 0,48      |
| SVN003<br>(PRN199) | LNAV        | 0,74   | 0,81 | 0,63 | 0,71    | 0,64 | 0,63      |
|                    | CNAV        | 0,75   | 0,76 | 0,62 | 0,65    | 0,66 | 0,63      |
| SVN004<br>(PRN195) | LNAV        | 0,93   | 0,83 | 0,88 | 0,99    | 0,88 | 0,92      |
|                    | CNAV        | 0,93   | 0,81 | 0,89 | 0,98    | 0,89 | 0,95      |

Illustration 40 — Performance du QZSS

#### 5.1.2.1.4 Situation actuelle et plans de modernisation

Après le lancement réussi du satellite QZS-1R en octobre 2021, le QZSS a engagé le remplacement du satellite de la constellation. Le QZSS est devenu opérationnel en novembre 2018 avec quatre satellites. Trois satellites supplémentaires seront lancés en orbite géosynchrone inclinée, en orbite géostationnaire à 90,5° de longitude est et en orbite quasi géostationnaire à 175° de longitude ouest. En outre, deux satellites géostationnaires et un satellite quasi géostationnaire viendront compléter la nouvelle constellation. L'Agence japonaise pour l'exploration aérospatiale (JAXA) prévoit de lancer des **services fondés sur les sept satellites de la constellation d'ici à 2023** et des services de PPP et d'authentification d'ici à 2024.

De plus amples informations sont disponibles sur la page [Navipedia](#).

### 5.1.2.2 IRNSS (NavIC)

Le système de navigation par satellite régional de l'Inde (IRNSS), au nom opérationnel «NavIC» (acronyme de «Navigation with Indian Constellation»), est un système de navigation par satellite **régional** autonome qui fournit des services précis de positionnement et de synchronisation en temps réel. Il couvre l'**Inde** et ses environs jusqu'à une distance de 1 500 kilomètres (930 milles), et une extension du territoire couvert est prévue. Une zone de service élargie se situe entre la zone de service principale et une zone rectangulaire délimitée par le 30° parallèle sud et le 50° parallèle nord, et par le 30° méridien est et le 130° méridien est, allant de 1 500 à 6 000 kilomètres au-delà des frontières.

La constellation se compose de huit satellites (dont sept sont opérationnels). Trois des huit satellites sont en orbite géostationnaire à des longitudes de 32,5° E, 83° E et 131,5° E, à environ 36 000 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre. Les cinq autres satellites sont des satellites IGSO. Deux d'entre eux traversent l'équateur à 55° E et deux à 111,75° E.

#### 5.1.2.2.1 Services de l'IRNSS

NavIC fournira deux niveaux de services:

- un **service de positionnement standard (SPS)**, ouvert à des fins civiles;
- un **service restreint (RS)** crypté pour les utilisateurs autorisés (y compris l'armée).

#### 5.1.2.2.2 Caractéristiques principales

Les deux services de NavIC seront délivrés sur les bandes L5 (1 176,45 MHz) et S (2 492,028 MHz). Le signal du service de positionnement standard sera modulé par un signal BPSK d'1 MHz, tandis que le service restreint utilisera BOC (5,2). Les signaux de navigation eux-mêmes seraient transmis sur la bande S (2 à 4 GHz) et diffusés par une antenne réseau à commande de phase pour maintenir la couverture et la robustesse de signal requises.

Tableau 16 — Caractéristiques principales des signaux IRNSS

| L5                             |          |           |
|--------------------------------|----------|-----------|
| Signal                         | L5 SPS   | L5 RS     |
| Fréquence (MHz)                | 1 176,45 | 1 176,45  |
| Technique d'accès              | CDMA     | CDMA      |
| Modulation                     | BPSK (1) | BOC (5,2) |
| Puissance minimale reçue [dBW] | -159,0   | -159,0    |

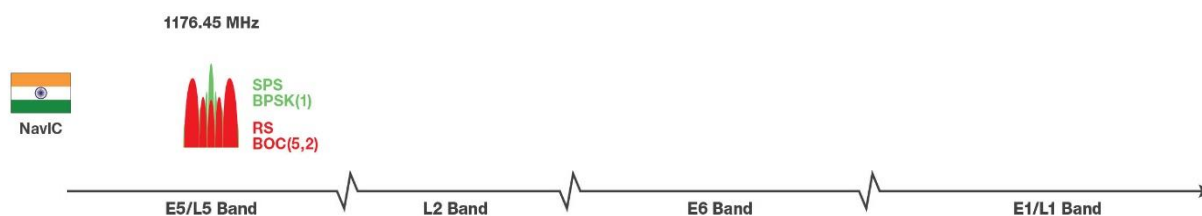


Illustration 41 — Signaux IRNSS (source: [Navipedia](#))

Pour exploiter les signaux IRNSS, les utilisateurs doivent simplement disposer d'un récepteur compatible. L'IRNSS peut être utilisé par un nombre illimité d'utilisateurs en même temps.

#### 5.1.2.2.3 Performance

Les performances de l'IRNSS sont décrites dans les rapports techniques disponibles sur le [site web du programme IRNSS](#). La précision de mesure de distance pour les utilisateurs des satellites de l'IRNSS en 2021 est présentée dans l'[illustration 42](#).

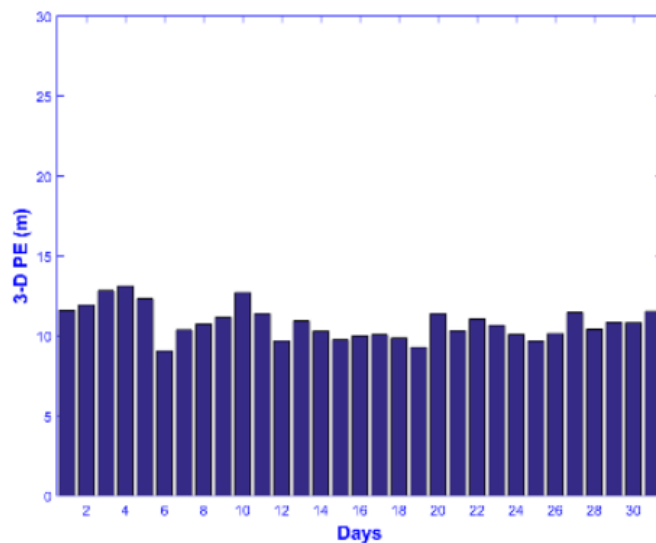


Illustration 42 — Précision de la télémétrie pour les utilisateurs de l’IRNSS en décembre 2021 (source: [rapport officiel de l’IRNSS sur le quatrième trimestre de 2021](#))

#### 5.1.2.2.4 Situation actuelle et plans de modernisation

Dans son [12<sup>e</sup> plan quinquennal \(2012-2017\)](#), le [ministère indien de l’espace](#) a prévu d’augmenter le nombre de **satellites** de la constellation en le faisant passer de 7 à 11 afin d’élargir la couverture. Ces quatre satellites supplémentaires seront lancés en orbite géosynchrone à une inclinaison de 42°.

L’Organisation indienne pour la recherche spatiale (ISRO) lancera cinq satellites de nouvelle génération contenant de nouvelles charges utiles et affichant une durée de vie plus longue de 12 ans. Les nouveaux satellites diffuseront sur les bandes L5 et S, transmettront un **nouveau signal civil interopérable sur la bande L1** dans le cadre de la charge utile de navigation et utiliseront l’**étalon indien de fréquence atomique du rubidium**.

L’étude et l’analyse du système mondial de navigation indien (GINS) ont été lancées dans le cadre des initiatives technologiques et politiques de 2012. Ce système devrait se composer d’une constellation de 24 satellites à 24 000 kilomètres au-dessus de la Terre. En 2013, les demandes réglementaires d’utilisation du spectre de fréquences pour les orbites des satellites du GINS dans l’espace international ont été déposées. [L’ISRO et le ministère indien de l’espace](#) œuvrent à un élargissement de la couverture de NavIC, pour la faire passer de l’échelle régionale à l’échelle mondiale; le système sera alors indépendant à l’égard des autres systèmes de ce type actuellement opérationnels, à savoir les systèmes GPS, GLONASS, BeiDou et Galileo, tout en conservant son interopérabilité et sa gratuité pour une utilisation publique dans le monde.

#### 5.1.2.3 Système de positionnement coréen (KPS)

Le système de positionnement coréen (KPS) est la constellation de satellites de la Corée du Sud que ce pays entend mettre en place d’ici à 2035. Il fournira des signaux de positionnement et de navigation indépendants sur une zone d’un rayon de 1 000 kilomètres autour de la capitale, Séoul. Le KPS devrait compter sept satellites: trois en orbite géosynchrone et quatre en orbite géosynchrone inclinée au-dessus de la péninsule coréenne. Le KPS devrait améliorer la précision du système GPS, qui passerait de dix mètres à moins d’un mètre.

Le premier satellite sera lancé en 2027, avec un service d’essai prévu pour 2034 et le régime de croisière pour l’année suivante.

## 5.1.3 Systèmes de renforcement

### 5.1.3.1 Systèmes spatiaux

Les systèmes de renforcement spatiaux des GNSS sont les systèmes dans le cadre desquels les corrections GNSS sont transmises aux utilisateurs via des satellites et les informations de renforcement sont donc fournies à *grande échelle* (c'est-à-dire à une échelle continentale).

Il existe deux types de systèmes de renforcement des GNSS de ce genre: les systèmes de renforcement satellitaire (SBAS) et le positionnement ponctuel précis (PPP).

#### 5.1.3.1.1 Systèmes de renforcement satellitaire (SBAS)

Les SBAS fournissent des **services de renforcement** pour améliorer la précision et l'intégrité des signaux GNSS. Ils peuvent également diffuser les signaux de mesure de distance des GNSS depuis leur segment spatial. La **précision** est améliorée par la transmission de corrections à grande échelle des erreurs GNSS en matière de mesure de distance, tandis que l'**intégrité** est garantie par la détection rapide des erreurs dans les signaux des satellites et des erreurs ionosphériques, ainsi que par l'envoi d'alertes aux utilisateurs.

Un SBAS est constitué d'un **segment spatial** (satellites géostationnaires), d'un **segment terrestre** (stations de référence, stations maîtresses et stations de liaison montante), d'un **segment utilisateur** (récepteurs utilisateurs traitant les signaux du SBAS) et d'un **segment de soutien** (pour soutenir la fourniture des services du SBAS).

Les stations de référence du SBAS sont principalement réparties géographiquement sur la zone de service du SBAS et reçoivent des signaux des GNSS, qu'elles transmettent aux stations maîtresses du SBAS. Étant donné que la localisation des stations de référence est connue avec précision, les stations maîtresses peuvent calculer avec précision des corrections à grande échelle. Ces corrections sont envoyées à des stations consacrées à la liaison montante vers les satellites du SBAS, lesquels les diffusent aux récepteurs GNSS dans l'ensemble de la zone couverte par le SBAS.

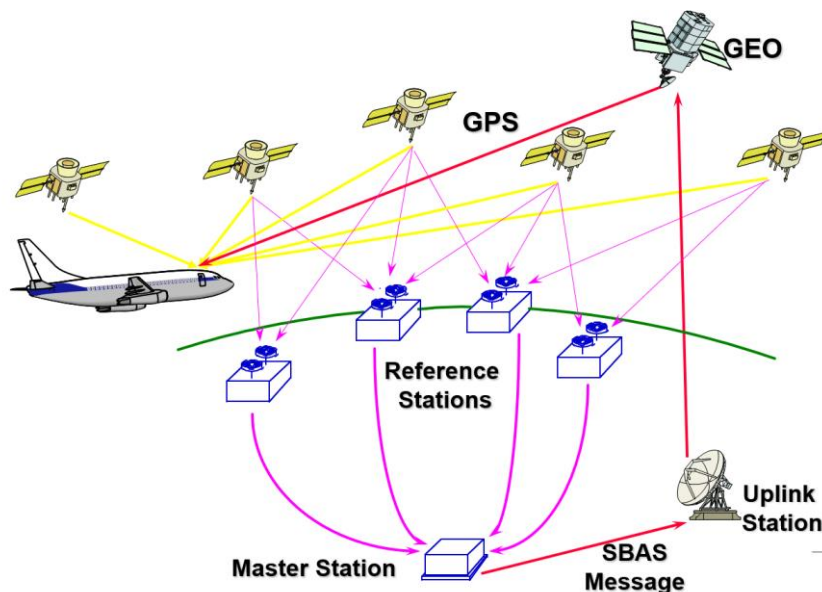


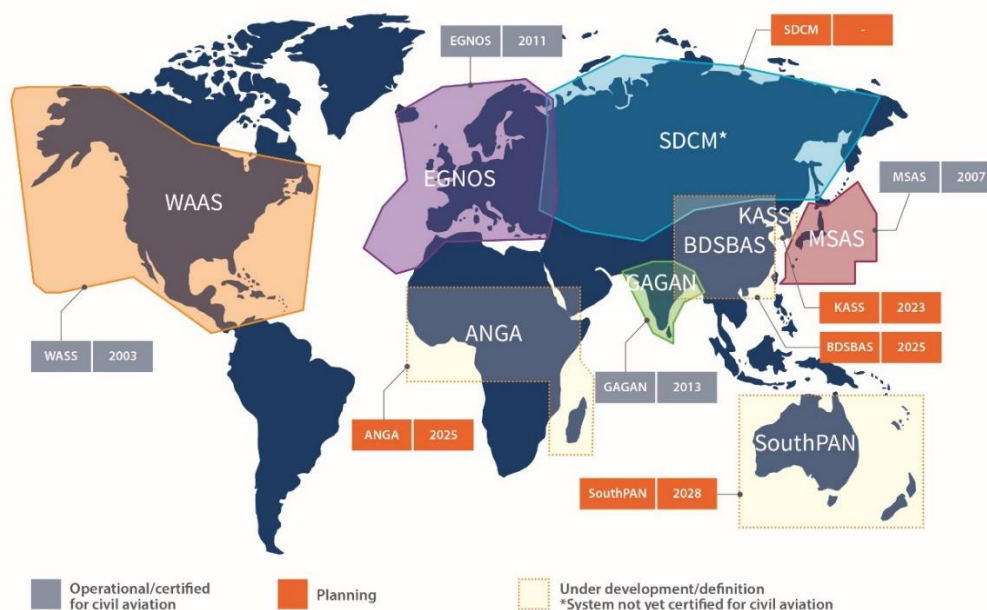
Illustration 43 — Architecture d'un SBAS (source: [OACI](#))

Les services du SBAS sont utilisés pour des **applications de sauvegarde de la vie**, dans le secteur aéronautique par exemple. En ce qui concerne la **navigation**, le SBAS permet des approches LPV (c'est-à-dire des approches de précision qui fournissent un guidage latéral et vertical semblable au guidage des approches ILS, mais sans infrastructure au sol in situ). En ce qui concerne la **surveillance**, le SBAS permet un meilleur positionnement des aéronefs, ce qui permet de réduire la séparation entre les aéronefs et d'améliorer d'autres opérations dans les aéroports. De plus amples informations sur les avantages des SBAS dans le secteur aéronautique sont disponibles dans la section [3.4.3](#).

Il existe plusieurs SBAS (voir l'[Illustration 44](#) pour une vue d'ensemble):

- le [système européen de navigation par recouvrement géostationnaire \(EGNOS\)](#), le système de renforcement européen qui améliore la précision des positionnements fournis par les signaux GPS (et Galileo à l'avenir) et met en garde les utilisateurs sur la fiabilité des signaux. EGNOS transmet des données de correction différentielle à usage public et est certifié pour les applications de sauvegarde de la vie (services opérationnels depuis 2011);
- le [système de renforcement à couverture étendue \(Wide Area Augmentation System\)](#) mis au point par l'Agence fédérale de l'aviation des États-Unis (FAA), qui fournit des corrections GPS et est certifié pour l'aviation civile depuis 2003;
- le [système de renforcement des satellites MTSAT \(MSAS\)](#), un SBAS qui fournit des services de renforcement au Japon depuis 2007;
- le [système GAGAN de renforcement des performances du GPS \(GPS Aided Geo Augmented Navigation ou GPS and Geo Augmented Navigation system\)](#), un SBAS qui soutient la navigation aérienne au-dessus de l'espace aérien indien depuis 2013;
- le [système de renforcement satellitaire coréen \(KASS\)](#), en développement et en construction, depuis octobre 2014, principalement par l'Institut coréen de recherche aérospatiale (KARI), conformément à l'annexe 10 de l'OACI. Ce SBAS devrait fournir des services de sauvegarde de la vie APV-1 en 2024;
- le SBAS [ANGA \(Augmented Navigation for Africa\)](#) de l'ASECNA, développé dans le cadre de l'initiative «SBAS pour l'Afrique et l'océan Indien». L'ANGA vise à fournir des services de SBAS pour les opérations NPA, APV-1 et CAT I en 2025. Des services bifréquences et multiconstellations complets sont attendus au-delà de 2028/2030 pour les opérations d'atterrissage automatique CAT I, et éventuellement pour d'autres opérations;
- le [système méridional de renforcement du positionnement \(SouthPAN\)](#), le SBAS opérationnel de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande, qui devrait atteindre la capacité opérationnelle complète en 2025;
- le [système de renforcement fondé sur les satellites de BeiDou \(BDSBAS\)](#), développé par la Chine pour fournir des services de SBAS dans ce pays et dans les régions voisines. Le BDSBAS devrait fournir ses services en 2025 et être intégré dans le système BeiDou; il utiliserait des satellites de type BDS-3 pour diffuser le signal SBAS L1/L5 afin de renforcer les systèmes BeiDou et GPS;
- le [système de correction différentielle et de surveillance \(SDCM\)](#), développé par la Russie pour améliorer dans ce pays la précision et la surveillance de l'intégrité pour les systèmes de navigation tant de GLONASS que du système GPS. Le SDCM fournira également des services de positionnement ponctuel précis (PPP) pour les signaux GLONASS L1/L3.

SBAS Indicative Service areas



The picture depicts available information as of September 2022 and may be subject to changes.

Illustration 44 — Les SBAS et leurs zones de services indicatives (source: EUSPA)

### 5.1.3.1.2 Positionnement ponctuel précis (PPP)

Le **positionnement ponctuel précis (PPP)** fournit une précision centimétrique sur la base de corrections [des orbites et des horloges des satellites](#) distribuées par satellite ou sur l'internet. Étant donné que le modèle d'erreur est très précis, cette solution nécessite une période de convergence pour d'abord filtrer les observations du code et de la porteuse, puis pour estimer l'erreur d'horloge du satellite, le retard troposphérique au zénith (ZTD) et les ambiguïtés de la phase flottante pour tous les satellites. La précision et le temps de convergence dépendent des conditions environnementales, de la qualité des corrections et de la mise en œuvre de l'algorithme EKF (filtre de Kalman étendu). Un positionnement moins précis reposant uniquement sur le code est également possible.

Il existe **plusieurs fournisseurs commerciaux de services de PPP**, notamment [Hexagon Veripos](#), [TerraStar](#), [Trimble OmniSTAR](#), [Fugro Seastar](#), [u-blox PointPerfect](#), [Swift Navigation Skylark](#) et [Deer StarFire](#). Ces fournisseurs estiment les erreurs et les biais associés à la position et à l'horloge des satellites grâce à un réseau de stations au sol qui recueillent des observations sur différents signaux et constellations. Le service apporte des corrections aux composantes de l'erreur estimée et les transmet aux utilisateurs par satellite ou par voie terrestre (par exemple, via l'internet). Galileo fournit également un service de PPP en temps réel gratuit avec une couverture mondiale par l'intermédiaire de son **service haute précision** (section [3.2.2](#)).

Le positionnement haute précision du **PPP traditionnel** présente certaines limites en ce qui concerne le délai de convergence. En effet, il peut s'écouler plusieurs minutes avant que le récepteur ne fournisse un positionnement de précision centimétrique. Cette solution très utile est largement adoptée dans des applications statiques telles que l'arpentage. Dans les conditions environnementales potentiellement difficiles pour les applications dynamiques (drones, micromobilité, agriculture de précision, voitures autonomes, opérations maritimes automatiques, etc.), la performance sur le plan de la précision et du délai de convergence n'est pas garantie. Dans ces situations, des techniques intégrant des cartes numériques et des capteurs locaux sont nécessaires pour surmonter les limites résultant des erreurs locales et fournir un positionnement de précision centimétrique.

### 5.1.3.2 Systèmes terrestres

#### 5.1.3.2.1 Systèmes de renforcement au sol (GBAS)

Un **système de renforcement au sol (GBAS)** est un système critique pour la sécurité de l'aviation civile qui soutient le **renforcement local au niveau des aéroports** des signaux provenant des constellations GNSS. Un GBAS est principalement destiné à soutenir les opérations d'approche de précision.

Un GBAS complet se compose d'un **sous-système terrestre** et d'un **sous-système embarqué à bord de l'aéronef**. Le sous-système terrestre du GBAS peut prendre en charge un nombre illimité d'unités d'aéronefs dans son volume de couverture GBAS, en fournissant à l'aéronef des données sur la trajectoire d'approche et, pour chaque satellite visible, des **corrections différentielles** et des informations sur l'**intégrité**. Ces corrections permettent à l'aéronef de déterminer plus précisément sa position par rapport à la trajectoire d'approche, ce qui permet de procéder à des opérations plus exigeantes et de guider l'aéronef vers la piste d'atterrissage en toute sécurité.

L'infrastructure au sol du GBAS comprend **au moins deux récepteurs de référence GNSS** à l'aéroport équipé du GBAS, lesquels collectent des pseudodistances à partir des satellites des GNSS visibles et calculent et diffusent pour ces satellites, sur la base du positionnement mesuré par eux-mêmes, des corrections différentielles et des informations sur l'intégrité. Ces corrections différentielles sont transmises du système terrestre au récepteur compatible avec le GBAS présent à bord de l'aéronef, via une diffusion de données très haute fréquence (VHF). Les informations diffusées comprennent des corrections des pseudodistances, des paramètres d'intégrité et diverses données pertinentes au niveau local, telles que les données du segment d'approche finale (FAS).



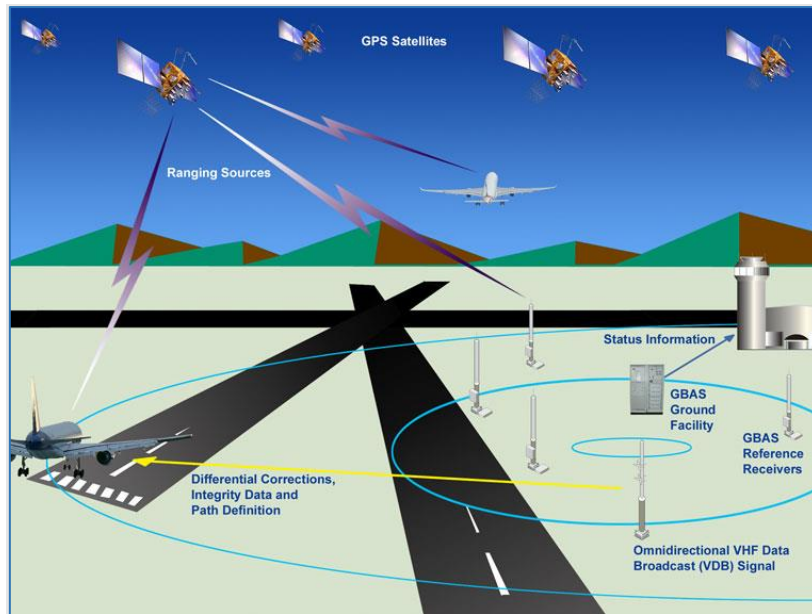


Illustration 45 — Architecture d'un GBAS (source: [FAA](#))

Le GBAS fournit ses services aux aéronefs compatibles sur une zone locale d'environ 30 kilomètres autour de l'aéroport. L'aéronef utilise les corrections différentielles pour calculer une position améliorée (en garantissant l'intégrité), qu'il utilise pour effectuer sa transition de l'espace aérien en route à l'espace aérien de la zone terminale et pour y naviguer avec précision.

Si le GBAS a pour principal objectif de fournir une assurance d'intégrité, il augmente également la précision en réduisant les erreurs de positionnement à moins d'1 mètre. Un GBAS est généralement conçu pour satisfaire à l'approche de précision CAT I et, depuis très récemment, des opérations CAT II sont également possibles ([opérations CAT II dans le cadre du GBAS à Francfort](#)).

De plus amples informations sur l'architecture et les performances du GBAS sont disponibles sur la page [GBAS de Navipedia](#).

#### 5.1.3.2 GNSS différentiels, positionnement cinématique en temps réel (RTK) et positionnement ponctuel précis (PPP)

Un **GNSS différentiel (DGNSS)** est un type de système de renforcement qui utilise un réseau de stations de référence terrestres pour **diffuser des informations différentielles** au récepteur utilisateur, également appelé «rover», afin d'améliorer la précision de son positionnement.

L'appellation DGNSS est souvent utilisée pour désigner spécifiquement les systèmes qui rediffusent les corrections provenant d'émetteurs terrestres à courte portée. Par exemple, aux États-Unis et au Canada, les garde-côtes utilisent un système de ce type sur les radiofréquences à ondes longues comprises entre 285 kHz et 325 kHz. Ces fréquences sont couramment utilisées pour la radio marine et sont diffusées à proximité des principales voies navigables et des grands ports. L'Australie exploite deux systèmes de GPS différentiel: l'un, géré par l'Autorité australienne de sécurité maritime, est utilisé principalement pour la navigation maritime et diffuse son signal sur la bande à ondes longues; l'autre est utilisé pour l'arpentage foncier et la navigation terrestre, ses corrections étant transmises sur la bande radio FM commerciale.

Le positionnement cinématique en temps réel (RTK) et le RTK à large couverture sont d'autres techniques de DGNSS utilisées pour des applications de navigation/d'arpentage haute précision fondées sur l'utilisation de mesures de la phase de la porteuse.

Le **RTK** est une technique de GNSS différentiel qui offre des performances de positionnement élevées à proximité d'une station de base. Une station de base RTK couvre une zone de service s'étendant jusqu'à 50 kilomètres au maximum et un canal de communication en temps réel est nécessaire pour les liaisons entre la base et le rover. Le RTK garantit une précision centimétrique.

La technique du **RTK à large couverture (WARTK)**, également connue sous le nom de «RTK en réseau», permet l'extension des services locaux sur la base de la résolution de l'ambiguïté de la phase de la porteuse en temps réel sur un large territoire (c'est-à-dire plus de 100 kilomètres), tant pour les utilisateurs bifréquences que pour les utilisateurs trifréquences. En utilisant des observations des pseudodistances et de la phase de la porteuse bifréquences ou trifréquences, ainsi que les données de correction reçues, le récepteur utilisateur peut effectuer un positionnement absolu de précision centimétrique. Cette technique repose sur une combinaison optimale de modèles ionosphériques et géodésiques précis dans un réseau de stations de référence à fonctionnement continu.

Ces dernières années, les approches définies pour déterminer les corrections GNSS et les transmettre ont été associées à un PPP pour donner lieu à des services de correction GNSS par **PPP-RTK** (le nom de «services de correction par représentation de l'espace d'état» — SSR — est aussi parfois utilisé), qui donnent le meilleur des deux mondes: une initialisation rapide et une précision proche de ce que permet le RTK, d'une part, et la capacité de fonctionner pendant une courte période sans corrections grâce aux algorithmes du PPP, d'autre part. À l'instar des solutions de PPP, le PPP-RTK repose sur un modèle d'erreurs GNSS valable sur un large territoire géographique et diffuse les différents composants (ou états) de l'erreur GNSS selon une communication unidirectionnelle. Les récepteurs GNSS calculent ensuite les corrections GNSS pour leur localisation spécifique.

Le nombre de services de PPP en temps réel qui sont diffusés au moyen d'un canal terrestre via l'internet est en augmentation, de sorte que le PPP peut aussi être qualifié de nouvelle catégorie de service terrestre.

#### 5.1.3.3 Systèmes fondés sur les récepteurs

Les récepteurs dans les applications critiques pour la sécurité utilisent des techniques de **contrôle autonome de l'intégrité par le récepteur (RAIM)** pour garantir le niveau de sécurité de la solution de positionnement. Le RAIM repose sur un contrôle de cohérence entre les relevés effectués par différents satellites et avertit l'utilisateur si une incohérence est détectée. Si tel est le cas, il peut y avoir exclusion du satellite ou interruption du service de positionnement.

Les évolutions récentes des systèmes de renforcement fondés sur les aéronefs (ABAS) dans le secteur aéronautique sont principalement liées au contrôle autonome avancé de l'intégrité par le récepteur (ARAIM) pour les utilisateurs bifréquences et multiconstellations. De plus amples informations sont disponibles dans la section [3.2.8](#).

## 5.2 Systèmes PNT conventionnels

### 5.2.1 NDB



Une **balise non directionnelle (Non-Directional Beacon — NDB)** est une aide radio à la navigation qui **permet au matériel compatible d'un aéronef de déterminer sa position relativement à cette balise**. Les NDB sont des systèmes très simples, composés d'une antenne omnidirectionnelle qui diffuse en permanence un signal porteur à une fréquence fixe. Les aéronefs équipés d'un radiocompas (ADF) peuvent calculer l'angle d'arrivée de ce signal (c'est-à-dire le relèvement par rapport à la NDB). Plusieurs NDB peuvent être utilisées pour indiquer la direction.

*Illustration 46 — Site d'implantation d'une NDB (source: Krd, dans le cadre de la licence Creative Commons [Attribution -](#)*

*[Partage dans les mêmes conditions 4.0 International](#))*

#### 5.2.1.1 Caractéristiques principales

Les NDB utilisent la bande de fréquences de 190 kHz à 1 750 kHz et transmettent en permanence un signal porteur modulé contenant des informations d'identification. Leurs signaux suivent la courbure de la Terre, de sorte que leur couverture peut atteindre de 25 à 150 milles marins. La précision du système dépend de l'équipement ADF installé à bord de l'aéronef, mais **la précision minimale requise par l'OACI pour une NDB est de  $\pm 5^\circ$** .

Chaque NDB est identifiée individuellement par un code qui sera transmis au moins une fois toutes les 30 secondes. Les NDB incluent un système de surveillance qui détecte les dysfonctionnements de la NDB ou du système de surveillance lui-même. Les spécifications sont énoncées à l'[annexe 10, volume I, Aides radio à la navigation, de l'OACI](#).

Le système de NDB n'a aucune limite de capacité et peut desservir n'importe quel nombre d'aéronefs.

#### 5.2.1.2 Situation actuelle et plans de rationalisation

Les NDB font partie depuis des décennies de l'infrastructure au sol des aides à la navigation pour la gestion du trafic aérien. Toutefois, en raison de leurs limites techniques, de l'apparition des GNSS et de la transition vers la navigation fondée sur les performances (PBN), **les NDB devraient cesser d'être opérationnelles dans un avenir proche**, à la suite de la proposition de désactivation figurant dans le [plan directeur ATM européen](#) et dans l'optique de la mise en œuvre du [règlement d'exécution sur la PBN](#).

Le [plan mondial de navigation aérienne \(GANP\) de l'OACI](#) prévoit que les NDB deviendront moins importantes en tant qu'aides radio à la navigation et que leur désactivation pourrait être possible.

De plus amples informations sont disponibles sur la page [Balise non directionnelle de Wikipédia](#).

## 5.2.2 VOR

Un **radiophare omnidirectionnel VHF (VHF Omnidirectional Radio Range — VOR)** est un système qui permet à un aéronef équipé d'un récepteur de **déterminer le relèvement magnétique de la station à l'aéronef** (le «radial VOR»).

Le VOR utilise un réseau circulaire d'antennes transmettant deux signaux radio. Le premier signal (le **signal de référence**) rayonne de manière omnidirectionnelle, de sorte que sa phase est égale dans toutes les directions. Le deuxième signal (le **signal variable**) rayonne de manière directionnelle. La phase du signal variable que l'aéronef reçoit dépend du radial sur lequel se trouve le récepteur par rapport au nord magnétique. Les



équipements embarqués à bord de l'aéronef reçoivent les deux signaux et le radial VOR est estimé sur la base de leur différence de phase. Si le VOR est couplé à un DME (voir section [5.2.3](#)), l'aéronef peut également calculer sa distance par rapport au VOR et déterminer un relevé de position. Cette méthode est la «navigation VOR/DME».

*Illustration 47 — Site d'implantation d'un VOR (source: Marc Lambert, dans le cadre de la [licence Creative Commons](#))*

L'intersection des radials de deux stations VOR différentes permet également aux aéronefs de déterminer un relevé de position et de naviguer d'un point à un autre.

### 5.2.2.1 Caractéristiques principales

Le VOR utilise la bande de fréquences de 108 MHz à 117,975 MHz, en polarisation horizontale. La précision des informations de relèvement doit être de  $\pm 2^\circ$ . La couverture du système est limitée par la ligne de visibilité, jusqu'à une élévation de  $40^\circ$ , et atteint de 25 à 130 milles marins. **Le VOR doit être équipé d'une unité de surveillance** qui génère un avertissement et retire les informations de navigation de la porteuse ou coupe la puissance rayonnée si certaines conditions de fourniture du service ne sont pas remplies. Il en va de même en cas de défaillance de l'unité de surveillance elle-même.

[Le VOR répond de manière adéquate aux exigences de précision pour la RNAV 5](#). Dans le cas d'un VOR Doppler, la portée maximale à laquelle le VOR peut atteindre une performance d'1 mille marin est de 23 milles marins à partir du VOR, ce qui ne fournit donc pas le niveau de précision nécessaire pour répondre à des spécifications de navigation plus exigeantes sur une portée plus longue. Les spécifications sont énoncées à l'[annexe 10, volume I, Aides radio à la navigation, de l'OACI](#).

Le système de VOR n'a aucune limite de capacité et peut desservir n'importe quel nombre d'aéronefs.

### 5.2.2.2 Situation actuelle et plans de rationalisation

Les VOR font partie depuis des décennies de l'infrastructure au sol des aides à la navigation pour la gestion du trafic aérien. Toutefois, en raison de leurs limites techniques, de l'apparition des GNSS et de la transition vers la navigation fondée sur les performances (PBN), les VOR devraient perdre de leur importance au cours des années à venir. Le plan directeur ATM européen **prévoit une réduction du nombre de VOR jusqu'au stade d'un réseau minimal opérationnel** qui offrirait des **capacités de navigation limitées en cas de perturbation temporaire des GNSS**, conformément au [règlement d'exécution sur la PBN](#).

Le [plan mondial de navigation aérienne \(GANP\) de l'OACI](#) prévoit que les VOR deviendront moins importants en tant qu'aides radio à la navigation et que leur désactivation pourrait être possible.

De plus amples informations sont disponibles sur la page [VOR \(navigation aérienne\) de Wikipédia](#).

### 5.2.3 DME

Un **dispositif de mesure de distance (Distance Measuring Equipment — DME)** est un système qui permet d'obtenir la **distance oblique entre un aéronef et l'installation correspondante au sol**. Les DME se composent de deux éléments: un interrogateur et un transpondeur. L'interrogateur est situé à bord de l'aéronef et le transpondeur est situé au sol. L'interrogateur émet un signal radio (une paire d'impulsions gaussiennes) que le transpondeur reçoit et traite. Après un certain temps, le transpondeur répond avec un autre signal. Le temps de l'aller-retour permet de calculer la distance oblique entre l'aéronef et la station au sol. Les distances données par des DME de deux stations au sol différentes permettent à l'aéronef de connaître sa position et de naviguer d'un point à un autre. Cette méthode, appelée «DME/DME», est bien établie dans le monde entier.



*Illustration 48 — Site d'implantation d'un VOR/DME (le DME est dans la tour) (source: Hans-Peter Scholz, dans le cadre de la [licence Creative Commons](#))*

#### 5.2.3.1 Caractéristiques principales

Le DME utilise la bande de fréquences de 960 MHz à 1 215 MHz, en polarisation verticale. En principe, pour la navigation conventionnelle, les DME sont associés à des VOR ou à des ILS. Pour les applications de navigation fondée sur les performances (PBN), des installations DME autonomes peuvent être utilisées. En cas de couplage avec un VOR, la couverture du DME doit être au moins celle du VOR. En cas de couplage avec un ILS, la couverture du DME doit être au moins celle des secteurs de guidage en azimut de l'ILS. Le transpondeur du DME doit être équipé d'une unité de surveillance qui génère un avertissement et coupe la puissance rayonnée si certaines conditions de fourniture du service ne sont pas remplies, ou encore en cas de défaillance de l'unité de surveillance elle-même. Cette action doit intervenir dans les dix secondes qui suivent le début de la défaillance. Les spécifications sont énoncées à l'[annexe 10, volume I, Aides radio à la navigation, de l'OACI](#).

La précision du positionnement avec le DME/DME est de quelques centaines de mètres, ce qui conduit à des **précisions** pour la position de l'aéronef qui ne sont **pas meilleures que 0,3 mille marin** (avec la meilleure géométrie, soit un angle de coupe de 90°). Cela peut ne pas être suffisant pour les spécifications de navigation les plus exigeantes. L'utilisation des distances données par des DME dans plusieurs stations est l'une des solutions permettant d'améliorer la précision et l'intégrité du positionnement. Le **DME amélioré (eDME)** utilise une combinaison de méthodes de mesure de distance unidirectionnelles et bidirectionnelles et est proposé pour améliorer la précision des mesures de la distance et l'utilisation du spectre.

Les systèmes de DME modernes **peuvent prendre en charge jusqu'à 200 aéronefs**.

#### 5.2.3.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

Les DME font partie de l'infrastructure au sol des aides à la navigation pour la gestion du trafic aérien. Un réseau optimisé ou élargi soutiendra la navigation fondée sur les performances (PBN). **Les aides à la navigation DME/DME soutiennent les spécifications de navigation RNAV 5, RNAV 2, RNAV 1 et, dans certaines conditions, RNP 1 et A-RNP**. Les DME pourraient servir d'infrastructures complémentaires en cas de défaillance des GNSS. Le [plan directeur ATM européen](#) propose d'optimiser le réseau des DME, notamment pour mettre en œuvre le [règlement d'exécution sur la PBN](#).

Le [plan mondial de navigation aérienne \(GANP\) de l'OACI](#) qualifie les DME de solution de repli appropriée pour les GNSS aux fins de la PBN. Pour un bon service en cas d'indisponibilité des GNSS, il sera peut-être nécessaire d'élargir le réseau des DME.

Par ailleurs, le **DME amélioré** devrait **soutenir des spécifications de RNP plus strictes et permettre d'améliorer l'efficacité du spectre**, ce qui entraînera une réduction de la congestion sur la bande L. Il devrait permettre une mise en œuvre principalement au moyen de mises à jour des logiciels et de modifications minimales du matériel embarqué et du matériel au sol, tout en faisant en sorte que la capacité supplémentaire soit pleinement rétrocompatible pour favoriser une mise en œuvre continue. De plus amples informations sont disponibles sur la page [DME \(aviation\) de Wikipédia](#).



## 5.2.4 ILS

Un **système d'aide à l'atterrissage aux instruments (Instrument Landing System — ILS)** est un **système d'approche et d'atterrissage de précision** qui fournit aux aéronefs un guidage horizontal et vertical à courte portée juste avant et pendant l'atterrissage et indique, à certains points fixes, la distance par rapport au point



d'atterrissage de référence.

*Illustration 49 — Site d'implantation d'un ILS (LOC) (source: Super Dominicano, dans le cadre de la [licence de documentation libre GNU](#))*

Un ILS se compose:

- d'un **localizer**: système de guidage horizontal incorporé dans l'ILS qui indique l'écart horizontal de l'aéronef par rapport à sa trajectoire de descente optimale le long de l'axe de la piste;
- d'un **glide path**: système de guidage vertical incorporé dans l'ILS qui indique l'écart vertical de l'aéronef par rapport à sa trajectoire de descente optimale;
- de **radiobornes Marker**: émetteurs du service de radionavigation aéronautique qui rayonnent verticalement un motif distinctif pour donner des informations de positionnement aux aéronefs.

Dans l'actuelle annexe 10, ces radiobornes sont remplacées par un moyen de contrôle de l'altitude et ne font donc plus partie intégrante de l'ILS. Dans la plupart des aéroports européens, le moyen de contrôle de l'altitude fourni est le DME, qui remplace les radiobornes Marker et représente une amélioration par rapport à celles-ci.

### 5.2.4.1 Caractéristiques principales

Le localizer utilise la bande de fréquences de 108 MHz à 111,975 MHz. Les signaux sont modulés en amplitude par des tonalités de 90 Hz et de 150 Hz, chaque tonalité étant prédominante d'un côté de la piste, et polarisés horizontalement.

Le matériel du glide path utilise la bande de fréquences de 328,6 MHz à 335,4 MHz. Le rayonnement est modulé en amplitude par des tonalités de 90 Hz et de 150 Hz et polarisé horizontalement.

Les **radiobornes Marker** utilisent la fréquence de 75 MHz et leurs signaux sont polarisés horizontalement. Chaque installation doit comporter deux radiobornes Marker indiquant une distance prédéterminée. En général, la première (l'Outer Marker) serait située à environ 5 milles marins de la zone de toucher des roues, tandis que la deuxième (le Middle Marker) serait située à environ 1 mille marin de cette zone. Dans presque toutes les installations d'ILS européennes, les radiobornes Marker VHF sont remplacées par des DME couplés à l'ILS, ce qui permet au pilote de connaître en continu la distance horizontale par rapport à la piste.



**Les approches d'ILS sont classées en plusieurs catégories** et peuvent être suivies jusqu'à une certaine portée visuelle de piste (RVR) et une certaine hauteur de décision (DH) par des pilotes qualifiés pilotant des aéronefs dotés d'équipements compatibles en vue d'un atterrissage sur des pistes adéquatement équipées sans acquérir de référence visuelle comme suit:

- la catégorie CAT I permet une DH d'au moins 200 pieds et une RVR d'au moins 500 m;
- la catégorie CAT II permet une DH d'au moins 100 pieds et une RVR d'au moins 300 m;
- la catégorie CAT IIIA permet une DH inférieure à 100 pieds et une RVR d'au moins 200 m;
- la catégorie CAT IIIB permet une DH inférieure à 50 pieds et une RVR d'au moins 50 m;
- la catégorie CAT IIIC<sup>9</sup> est un atterrissage entièrement automatique avec guidage du roulage le long de l'axe central de la piste et sans aucune limitation de DH ou de RVR. Cette catégorie n'est actuellement pas disponible régulièrement.

Une unité de surveillance automatique transmet un avertissement si elle détecte une défaillance du système. Les spécifications sont énoncées à l'[annexe 10, volume I, Aides radio à la navigation, de l'OACI](#). Un ILS n'a aucune limite de capacité.

#### *5.2.4.2 Situation actuelle et plans d'optimisation*

L'ILS est aujourd'hui le système d'approche et d'atterrissage de précision le plus répandu. Toutefois, étant donné que les systèmes de renforcement satellitaire et au sol (SBAS et GBAS) permettent des opérations d'approche de précision, il est prévu de rationaliser l'infrastructure des ILS en Europe. Le [plan directeur ATM européen](#) reflète la nécessité de **rationaliser le réseau ILS CAT I et notamment l'infrastructure ILS CAT I** à l'horizon 2030 afin de mettre en œuvre le [règlement d'exécution sur la PBN](#), qui n'autorise les opérations ILS CAT I que dans des situations d'urgence (c'est-à-dire en cas de perte des services de PBN prévus dans ce règlement d'exécution).

En outre, le [plan mondial de navigation aérienne \(GANP\) de l'OACI](#) qualifie l'ILS d'aide à la navigation appropriée pour l'approche et l'atterrissage de précision. De plus amples informations sont disponibles sur la page [Système d'atterrissage aux instruments de Wikipédia](#).

---

<sup>9</sup> Il convient de signaler que l'OACI supprimera les sous-catégories CAT IIIA, IIIB et IIIC et les remplacera par le concept de minima opérationnels d'aérodrome fondés sur les performances (PBAOM).

## 5.2.5 TACAN

Un **système de navigation aérienne tactique (Tactical Air Navigation System — TACAN)** est un système de radionavigation principalement utilisé par l'OTAN et d'autres forces militaires qui fournit à un aéronef militaire un relèvement et une distance (oblique) par rapport à une installation au sol, à un navire ou à un aéronef doté d'équipements adéquats. En général, il peut être décrit comme le **système militaire équivalent au système**



**VOR/DME** à des fins de navigation. La composante DME du TACAN peut être destinée à un usage civil. Le TACAN est exploité en mode air-sol et/ou air-air. Dans le premier mode, les aéronefs compatibles TACAN peuvent utiliser le système pour la navigation en route ainsi que pour les approches classiques. Le TACAN peut être couplé à des stations VOR (installations VORTAC).

*Illustration 50 — Site d'implantation d'un TACAN (source: Nbonfanti, dans le*

*cadre de la licence Creative Commons Attribution - Partage dans les mêmes conditions 4.0 International)*

### 5.2.5.1 Caractéristiques principales

Le TACAN utilise la bande de fréquences de 960 MHz à 1 215 MHz. L'unité de relèvement du TACAN est plus précise que celle d'un VOR standard, car elle utilise un principe bifréquence (composantes de 15 Hz et de 135 Hz) et parce que les transmissions en UHF sont moins enclines à la courbure de signal que celles en VHF.

Le TACAN a une portée d'environ 200 milles marins. La précision de la composante azimut de 135 Hz est de  $\pm 1$  ou  $\pm 63$  m à 3,75 kilomètres. La précision de la composante DME doit être de 926 m (0,500 mille marin) ou de 3 % de la distance oblique, la valeur la plus élevée étant retenue. Les spécifications sont énoncées dans le document [FAA 9840.1 1982](#).

Le TACAN est l'un des systèmes militaires reconnus autorisés pour la navigation et le seul système autorisé pour certains aéronefs. Il a démontré son utilité en temps de paix et dans les situations de crise. **La sécurité du service fourni par le TACAN sur le plan de la résilience et de la vulnérabilité constitue un problème potentiel**. Par conséquent, le TACAN pourrait être remplacé à long terme par un système plus résilient aux menaces pour la sécurité.

### 5.2.5.2 Situation actuelle et plans de rationalisation

Le positionnement DME/DME a été qualifié de capacité essentielle à court terme pour soutenir les opérations de PBN. **L'utilisation des structures du TACAN** pour les opérations en route et les approches terminales est essentielle pour permettre aux exploitants d'aéronefs d'État d'accroître la flexibilité de l'espace aérien lorsqu'ils effectuent des opérations de GAT et **l'utilisation de la composante DME du TACAN pourrait permettre de surmonter les éventuelles limitations de couverture du réseau européen des DME**. La réutilisation des systèmes militaires devrait garantir la conformité avec les spécifications de la PBN et maintenir des niveaux de performance appropriés à cet effet.

De plus amples informations sont disponibles sur la page [TACAN de Wikipédia](#).

## 5.2.6 Loran

Un **système de navigation à longue distance (Long Range Navigation — Loran)** est un système de navigation hyperbolique, initialement mis au point dans les années 1950. Il fonctionne **en comparant le temps d'arrivée des signaux provenant de paires d'émetteurs synchronisés**. En recevant les signaux d'une paire d'émetteurs, dont il connaît la position, l'utilisateur peut circonscrire sa position à l'intérieur d'une ligne hyperbolique. La réception des signaux provenant de deux paires d'émetteurs supplémentaires limite cette position à une deuxième et à une troisième ligne hyperbolique. L'intersection des lignes hyperboliques donne la position du récepteur.

Le système Loran connaît différentes déclinaisons, chacune ayant un nom qui lui est propre (Loran, Loran-A, Loran-B, Loran-C, etc.). Chayka est un système russe quasiment identique au Loran. Les récepteurs sont généralement compatibles avec les deux systèmes de navigation.

De plus amples informations sont disponibles sur la page [LORAN de Wikipédia](#) et sur le site de l'[Association internationale Loran](#).

### 5.2.6.1 Loran-C/Chayka

Le Loran-C était la version la plus étendue du Loran.

#### 5.2.6.1.1 Caractéristiques principales

Le Loran-C utilise la bande de fréquences de 90 kHz à 110 kHz, pour une puissance de sortie comprise entre 100 kilowatts et plusieurs mégawatts. Les émetteurs Loran-C sont regroupés en chaînes. Chaque chaîne dispose d'une station maîtresse et de deux stations secondaires au moins. La station maîtresse transmet neuf impulsions à des intervalles prédéfinis. Chaque station secondaire, après réception de ces impulsions, attend pendant un laps de temps donné et transmet huit impulsions. Ces impulsions sont codifiées afin que le récepteur puisse identifier les différentes émissions. L'emplacement de la station maîtresse et des stations secondaires, l'intervalle de répétition de la station maîtresse et les délais des transmissions secondaires sont tous connus. Ainsi, lorsqu'un utilisateur reçoit toutes ces impulsions, il peut estimer le temps de propagation entre sa position et les différentes stations. À partir de cette information, il est possible d'estimer la localisation du récepteur.



*Illustration 51 — Émetteur Loran-C (source: Bin im Garten, dans le cadre de la licence Creative Commons [Attribution - Partage dans les mêmes conditions](#)*

[3.0 non transposé](#))

La **transmission de fréquences très basses à très haute puissance** nécessite des antennes de transmission qui mesurent quelques centaines de mètres de hauteur. Le schéma de rayonnement de ces antennes est omnidirectionnel. Les transmissions Loran-C doivent être synchronisées avec précision. Dans ce but, chaque émetteur comprend jusqu'à trois horloges atomiques. **Le Loran-C affiche une précision supérieure à 460 mètres et une disponibilité de 99,7 %**. Chaque émetteur **couvre généralement une zone pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres**. La couverture dépend de facteurs tels que les conditions jour/nuite, les conditions météorologiques ou le fait que la transmission soit diffusée en mer ou sur la terre ferme.

De plus amples informations sur les spécifications du Loran-C sont disponibles sur le [site web d'introduction au Loran-C](#). L'OACI n'a jamais élaboré de normes pour le Loran-C, lequel n'entre donc pas en ligne de compte pour l'aviation.

Le Loran-C n'a aucune limite de capacité.

#### 5.2.6.1.2 Situation actuelle et plans de rationalisation

L'essor des systèmes de navigation par satellite a fortement réduit le nombre d'utilisateurs du Loran-C. Ce système est toujours utilisé pour le service de radionavigation d'Extrême-Orient (FERNS) géré par la Russie, la

Chine et la République de Corée, mais de nombreux émetteurs ont été fermés au fil du temps. **En Europe, le Loran-C n'est pas utilisé**, l'Espagne, la Norvège, l'Islande, l'Italie, la France et l'Allemagne ayant mis fin à leurs transmissions Loran-C vers 2015.

### 5.2.6.2 eLoran

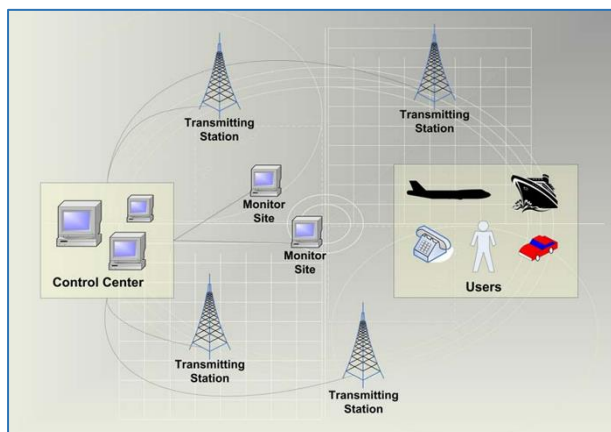
Le **Loran amélioré (eLoran)** est un système de radionavigation terrestre à basse fréquence et à longue portée, capable de fournir des services de positionnement, de navigation et de synchronisation (PNT) pour de nombreux modes de transport, en indépendance totale à l'égard des GNSS.

Le système eLoran transmet des signaux d'ondes pulsées à une fréquence centrale de 100 kHz, ce qui donne aux signaux leur capacité de navigation à longue portée au départ d'émetteurs largement espacés. La position du récepteur est déterminée par la mesure des temps d'arrivée (ou pseudodistances) de ces impulsions. **Il convient de mesurer les pseudodistances d'au moins trois émetteurs pour déterminer une solution de positionnement horizontal par trilatération.** Les émetteurs étant placés sur la surface de la Terre, l'altitude du récepteur ne peut pas être déterminée. En mesurant plus de trois transmissions (de préférence cinq), l'utilisateur dispose d'une capacité de RAIM (contrôle autonome de l'intégrité par le récepteur) en plus de la précision de positionnement.

#### 5.2.6.2.1 Caractéristiques principales

Le système eLoran fournit des services semblables à ceux du Loran, avec **plus de précision (de l'ordre de 20 m), de disponibilité et d'intégrité.** La principale différence par rapport au Loran-C est l'ajout dans le système eLoran d'une ou de plusieurs chaînes de données, émises en même temps que le signal Loran pour transmettre des corrections différentielles eLoran et/ou DGPS et des informations sur l'intégrité, en améliorant les performances (précision, intégrité, disponibilité et continuité) par rapport au système Loran, mais en ayant la même couverture. Il est également possible de transmettre des données supplémentaires, dont des messages de navigation. Ces améliorations nécessitent un réseau terrestre secondaire ad hoc de stations de référence, espacées de distances pouvant atteindre 50 kilomètres.

Le système eLoran se compose de stations émettrices, de sites de surveillance et d'un centre de contrôle. Les sites de surveillance vérifient la précision de la datation des signaux transmis et envoient des corrections au centre de contrôle, lequel collecte ces observations, les traite et produit les données de correction et d'intégrité



à diffuser par les stations émettrices. Ces stations transmettent les corrections en utilisant le canal de données. Les stations émettrices eLoran sont équipées d'horloges atomiques et les transmissions sont synchronisées avec l'UTC avec précision. Des signaux d'au moins trois stations émettrices sont nécessaires pour localiser un récepteur.

Illustration 52 — Système eLoran (source: [document définissant le système eLoran](#))

La précision du système eLoran en matière de positionnement et de synchronisation peut varier

considérablement au sein de la zone de couverture et est plus faible que ce que l'on obtient avec les GNSS. Néanmoins, les signaux eLoran sont transmis à très haute puissance et à très faible fréquence (ce qui nécessite une infrastructure complexe, notamment des antennes pouvant atteindre 200 mètres de hauteur), de sorte qu'il est très difficile de brouiller les récepteurs eLoran sans être détecté. En outre, les signaux à basse fréquence utilisés pénètrent à l'intérieur des bâtiments et d'autres zones où les signaux GNSS ne sont pas disponibles.

#### 5.2.6.2.2 Situation actuelle et plans de modernisation

**Les services eLoran ne sont pas fournis en Europe.** En décembre 2015, les organismes britannique et irlandais chargés de la gestion des phares ont annoncé l'arrêt de leur prototype de service eLoran au Royaume-Uni et en Irlande. Toutefois, la connaissance de ce système est telle qu'un service eLoran peut être déployé relativement rapidement.

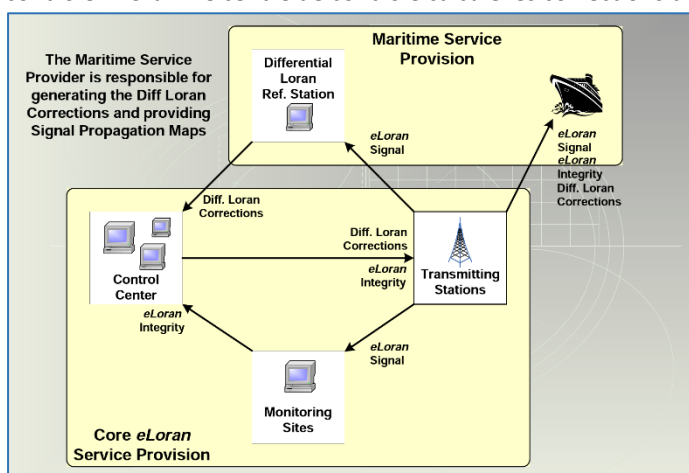
### 5.2.6.3 DLoran (eLoran différentiel)

Le système eLoran différentiel (DLoran) est un **système de renforcement local qui améliore les performances du système eLoran** sur une zone donnée.

#### 5.2.6.3.1 Caractéristiques principales

Le **principe de fonctionnement est semblable à celui des DGNSS**. Plusieurs stations de référence DLoran sont déployées sur le territoire concerné. Ces stations, dont la position exacte est connue, intègrent un récepteur eLoran et une liaison de communication avec un centre de contrôle DLoran. Les stations de référence utilisent le système eLoran pour estimer leur position et transmettent cette information au centre de contrôle DLoran, qui calcule les erreurs par rapport aux positions réelles. Ainsi, le centre de contrôle connaît les performances du système eLoran sur le territoire concerné et calcule les **corrections différentielles** pour la zone de couverture.

Un utilisateur du système DLoran a besoin d'un récepteur eLoran et d'une liaison de communication sans fil avec le centre de contrôle DLoran. L'utilisateur obtient sa position grâce au système eLoran et l'envoie au centre de contrôle DLoran. Le centre de contrôle calcule les corrections différentielles optimales pour cette position et les renvoie à l'utilisateur. Enfin, **l'utilisateur applique ces corrections et obtient des informations PNT améliorées**. La liaison de communication entre les utilisateurs et le centre de contrôle DLoran utilise le réseau public de téléphonie mobile (3G/4G).



renvoie à l'utilisateur. Enfin, **l'utilisateur applique ces corrections et obtient des informations PNT améliorées**. La liaison de communication entre les utilisateurs et le centre de contrôle DLoran utilise le réseau public de téléphonie mobile (3G/4G).

*Illustration 53 — Exemple de fourniture d'un service DLoran dans le secteur maritime (source: [document définissant le système eLoran](#))*

L'infrastructure DLoran (stations de référence et centre de contrôle) est indépendante du

système eLoran.

Des essais dynamiques effectués dans le port de Rotterdam ont montré une **précision meilleure que  $\pm 5$  mètres**.

#### 5.2.6.3.2 Situation actuelle et plans de modernisation

Le système DLoran est un système de renforcement local qui complète le système eLoran. Les transmissions Loran-C et eLoran ayant cessé en Europe en 2015, **les services DLoran n'y sont pas fournis**.

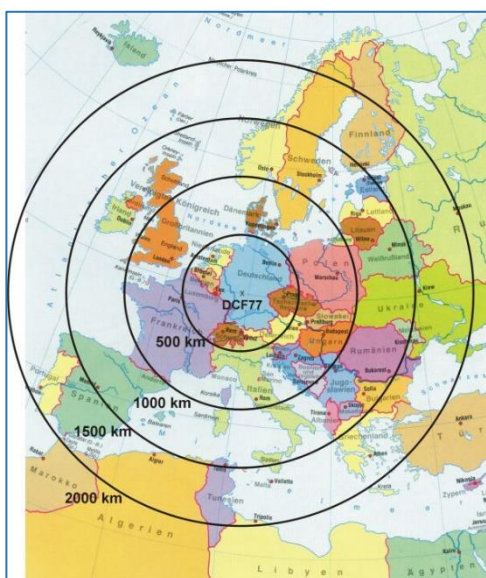


## 5.2.7 Systèmes de distribution du temps et de fréquences à ondes longues

Des systèmes à ondes longues (tels que [DCF77 en Allemagne](#), [MSF au Royaume-Uni](#) et [ALS162 en France](#)) sont utilisés en Europe depuis des décennies **pour distribuer le temps légal et des fréquences étalon**. Ces systèmes utilisent de très faibles fréquences et une grande puissance pour couvrir des distances pouvant atteindre des milliers de kilomètres. Les caractéristiques du système DCF77 sont présentées ci-dessous. Ces systèmes sont difficiles à leurrer ou à brouiller, et leurs faiblesses et les menaces auxquelles ils sont confrontés diffèrent radicalement de ce que l'on peut signaler pour les GNSS.

### 5.2.7.1 Caractéristiques principales

Le système DCF77 est l'une des méthodes utilisées par la PTB (l'Institut national de métrologie d'Allemagne) pour diffuser le temps légal et des fréquences étalon en Allemagne. Il utilise trois horloges atomiques pour générer une fréquence porteuse de 77,5 kHz. Une antenne omnidirectionnelle de 150 mètres de haut transmet le signal à une puissance isotrope rayonnée équivalente de 35 KW. Cette antenne se trouve à Mainflingen et a une **portée de quelque 2 000 kilomètres**, de sorte qu'elle couvre la plupart des pays d'Europe (certains territoires tels que l'Islande, le nord de la Norvège, le nord de la Suède, le nord de la Finlande, Chypre, les îles Canaries, les îles Açores, l'île de Madère et la Crète sont hors de portée).



La porteuse est modulée en amplitude pour transmettre les informations relatives à l'heure et à la date. Chaque seconde, l'amplitude de la porteuse est réduite à 15 % de sa valeur initiale. Un «0» binaire est transmis si l'abaissement de l'amplitude dure 0,1 seconde. Un «1» binaire est transmis si l'abaissement de l'amplitude dure 0,2 seconde. Ainsi, le système peut transmettre 60 bits par minute, ce qui signifie que l'utilisateur reçoit chaque minute des informations concernant l'année, le mois, le jour de la semaine, le jour du mois, l'heure et la minute. La seconde s'obtient en comptant le nombre d'abaissements de l'amplitude qui ont eu lieu depuis le début de la minute.

*Illustration 54 — Diffusion des signaux DCF77 en Europe (source: PTB)*

**L'écart moyen de la fréquence porteuse est inférieur à  $2 \times 10^{-12}$  par jour** sur le lieu de transmission. Le passage par zéro du **signal porteur est maintenu à  $5,5 \pm 0,3$  microseconde par rapport à la réalisation de l'UTC** par la PTB.

L'émetteur de signaux du système français ALS162 (162 kHz), exploité par TDF (Télédiffusion de France), est situé à Allouis (dans le Cher). Ce système utilise des horloges à jet thermique de césium et est raccordé par les techniques de vues communes GPS à l'échelle de temps UTC(OP), réalisée par le LNE-SYRTE à l'Observatoire de Paris.

### 5.2.7.2 Situation actuelle et plans de modernisation

Le système DCF77 est **opérationnel depuis 1959** et est toujours utilisé en Allemagne pour synchroniser les systèmes de mesure du temps dans les gares ferroviaires, dans les sociétés de télévision et de radiodiffusion et dans les secteurs de l'énergie et des télécommunications, ainsi que pour étalonner les générateurs de fréquences. Il est aussi utilisé par des particuliers en possession d'horloges radiopilotées. Un avantage du système DCF77 par rapport aux GNSS réside dans sa capacité à **pénétrer à l'intérieur des bâtiments** et dans les environnements difficiles. Sa **disponibilité** en 2016 était de **99,79 %**, à l'exclusion des coupures de moins de deux minutes. La [modernisation](#) du segment utilisateur est également possible, avec des outils de radio logicielle.



## 5.2.8 Horloges atomiques

Une horloge atomique **mesure le temps en surveillant la fréquence de rayonnement des atomes**. Les états électroniques d'un atome génèrent des niveaux d'énergie différents et les transitions entre les différents états produisent une fréquence très spécifique de rayonnement électromagnétique. En les mesurant, il est possible d'obtenir des relevés de temps et de fréquence précis.

Les horloges atomiques sont les **étalons primaires pour les services nécessitant une distribution précise du temps et de fréquences**, tels que les télécommunications à haut débit, la radiodiffusion télévisuelle et les GNSS. **Les GNSS ont besoin d'horloges atomiques de très haute précision**, tant à bord des satellites que dans le segment terrestre, pour calculer un temps de référence très exact et stable ainsi que des informations de navigation très précises. Des horloges atomiques de petite taille sont utilisées dans d'autres types de satellites en orbite autour de la Terre (LEO, MEO, GEO) ainsi que dans les sondes envoyées dans l'espace lointain.

Des étalons de fréquence atomiques à très haute performance (horloges à fontaine atomique de césium ou de rubidium, horloges atomiques optiques) sont également utilisés par les **instituts nationaux de métrologie (INM)**, qui jouent un rôle essentiel non seulement dans la réalisation du temps et de la fréquence UTC, mais également dans l'élaboration d'étalons de fréquence atomiques et de méthodes de mesure avancés. Les INM maintiennent des échelles temporelles de haute qualité et ils sont nombreux à distribuer temps et fréquences via l'internet, quelques-uns fournissant aussi des signaux radio à très basse fréquence (VLF) tels que les WWV.

De plus amples informations sont disponibles sur la page [Horloge atomique de Wikipédia](#) et dans le document [The Science of Timekeeping](#).

### 5.2.8.1 Caractéristiques principales

La performance de l'horloge peut être décrite sur le plan de la précision et de la stabilité:

- la **précision** est la mesure dans laquelle l'appareil s'aligne sur la référence idéale. Dans la plupart des applications PNT, il s'agit du degré de précision de l'horloge par rapport à l'UTC;
- la **stabilité** détermine dans quelle mesure l'appareil maintient sa fréquence par rapport à la fréquence étalon (c'est-à-dire en partant du principe que le seul objectif est le maintien de la fréquence). Le comportement caractéristique ne suit pas une distribution normale indépendante de l'intervalle du temps de mesure (bruit blanc aléatoire), de sorte que **l'écart type d'Allan** est utilisé pour estimer la stabilité de fréquence aléatoire, à savoir la différence fractionnaire moyenne quadratique entre les valeurs mesurées à un intervalle donné, après élimination de toute dérive systématique. Étant donné que l'écart type d'Allan, qui est sans dimension, est fonction de l'intervalle du temps de mesure, nous pouvons l'utiliser pour distinguer stabilité à court terme, stabilité à moyen terme et stabilité à long terme.

La stabilité à court terme est principalement déterminée (dominée) par les composantes de l'horloge, la stabilité à moyen terme par les perturbations environnementales (principalement la température, mais aussi la pression, l'humidité, les champs magnétiques et d'autres facteurs de ce genre), et la stabilité à long terme par le vieillissement (propriétés physiques du matériel).

Il existe principalement trois types d'horloges atomiques, qui sont par ordre de coût et de précision:

- les [horloges atomiques au rubidium](#), qui affichent une bonne stabilité à court terme, mais une précision de l'ordre de la microseconde par rapport à l'UTC jusqu'à un jour, en fonction des facteurs externes;
- les [horloges atomiques au césium](#), qui affichent une plus grande précision (microseconde jusqu'à une semaine) et une meilleure stabilité à moyen terme, mais qui subissent de petites fluctuations à court terme (stabilité par jour pire que celle des horloges atomiques au rubidium).

Tant les horloges atomiques au rubidium que les horloges atomiques au césium sont affectées par le bruit rose à moyen terme et par le vieillissement à long terme. En outre, la source de césium s'appauvrit au fil du temps et sa durée de vie utile de dix ans est plus courte que dans le cas du rubidium;

- les [masers à hydrogène](#), qui affichent la plus grande précision et la meilleure stabilité et un effet de vieillissement limité à long terme (un étalonnage reste néanmoins nécessaire pour le décalage de fréquence).

Étant donné que le système terrestre d'un GNSS peut étalonner à la fois des horloges atomiques au rubidium et des masers à hydrogène lancés dans l'espace, les satellites des GNSS déploient souvent des horloges atomiques au rubidium couplées à des masers à hydrogène passifs compensés par les horloges des stations au sol.

### 5.2.8.2 Horloge atomique à puce miniature (CSAC)

Au cours des 30 dernières années, la recherche s'est également concentrée sur la miniaturisation des horloges atomiques, conduisant au développement de l'**horloge atomique à puce miniature (CSAC)**. Il s'agit d'un appareil compact à faible consommation d'énergie qui utilise des systèmes microélectromécaniques (MEMS) et incorpore comme source de lumière un laser à semi-conducteur de faible puissance. Les CSAC commerciales actuelles mesurent moins de 17 cm<sup>3</sup>, pèsent 35 g et ont une puissance de moins de 120 mW; elles résistent à une plage de températures relativement large (de -40 à 85 °C). Elles maintiennent une précision de 10<sup>-7</sup> par jour. Ces caractéristiques permettent un large éventail d'opérations dans des domaines civils et spatiaux et dans la défense. Les véhicules autonomes, les drones, les dispositifs PNT tactiques et les satellites en LEO comptent parmi les marchés les plus prometteurs.

L'amélioration de la qualité des horloges bénéficie à quasiment toutes les applications PNT.

### 5.2.8.3 Situation actuelle et plans d'optimisation

Pour le plus long terme, la **recherche** se concentre sur:

- la consommation d'énergie et l'amélioration du matériel, par exemple l'amélioration des lasers pour remplacer la lampe à décharge des horloges au rubidium;
- la mise au point d'horloges à atomes froids pour des applications spatiales, des essais prometteurs de l'ESA et de la Chine ayant démontré la capacité de ces systèmes;
- le développement d'horloges optiques (ou d'horloges à réseau optique) pour les missions spatiales. Bien que certains composants aient déjà fait l'objet de recherches poussées, la technologie dans son ensemble n'est toujours pas suffisamment mature pour surmonter les problèmes de fabrication et répondre aux besoins de grande taille et de puissance. La plupart des expériences actuelles se concentrent sur des expérimentations de physique fondamentale. Néanmoins, avec la précision et la stabilité qu'elles offrent, ces nouvelles solutions pourraient remplacer les standards de temps actuels à l'avenir. De plus amples informations sur les technologies quantiques sont disponibles dans la section [5.3.11](#).

## 5.3 Technologies émergentes

La présente section recense et décrit les **technologies PNT émergentes** ayant la plus grande maturité et perçues comme étant les plus importantes. En raison de la nature de leur description, il a été nécessaire de simplifier les concepts et nous regroupons donc ces technologies sur la base de leur similitude au niveau matériel. Le présent appendice couvre:

- les technologies radioélectriques, terrestres (pseudolites, par exemple) ou spatiales (satellites en LEO);
- les technologies fournissant des services de synchronisation matures et hautement performants;
- la navigation mobile, qui est dans une certaine mesure agnostique sur le plan matériel et dépend fortement de la fusion de capteurs, de l'apprentissage automatique et de serveurs dorsaux; il s'agit d'une technologie de premier plan pour le marché de masse;
- les technologies non radioélectriques, telles que les systèmes inertiels et les capteurs magnétiques;
- les technologies visuelles, lidar ou radar, qui, bien qu'elles ne fournissent pas strictement de PNT, jouent un rôle important dans la fusion de capteurs;
- les technologies quantiques ou fondées sur des pulsars, qui pourraient offrir des performances très intéressantes à l'avenir.

En outre, l'utilisation de concepts avancés tels que les signaux d'opportunité ou la fusion de capteurs est examinée, mais pas dans le détail.

Il est intéressant de signaler que la plupart des technologies matures sélectionnées qui sont présentes sur le marché permettent la distribution horaire. La nécessité de solutions de datation de substitution a récemment été évoquée dans le [décret présidentiel n° 13905 du président des États-Unis](#) et dans le [programme du Centre national de synchronisation du Royaume-Uni](#). **La distribution horaire est activement développée dans l'UE**, avec le soutien du réseau unique d'instituts nationaux de métrologie (INM). Étant donné que ces derniers jouent un rôle important dans la réalisation du temps et de la fréquence UTC ainsi que dans l'élaboration d'étalons de fréquence atomiques avancés, il est naturel qu'un écosystème d'entreprises axées sur la distribution horaire se soit développé autour d'eux. Les systèmes de distribution du temps à ondes longues, le système eLoran et les horloges atomiques sont des technologies décrites dans l'appendice précédent qui permettent de fournir (et de maintenir) le temps UTC.

Les recherches bibliographiques et la [campagne d'essais du JRC sur des technologies PNT de substitution](#) montrent qu'**il est très difficile et coûteux de garantir la maturité, en vue de leur commercialisation, des technologies à même de fournir un PNT complet**. Les technologies décrites dans la présente section bénéficient d'années d'expérience (par exemple, à la Silicon Valley ou dans le pôle de recherche australien) et d'années d'investissements. Il est difficile de rivaliser avec cet avantage, étant donné que le marché des services en question est limité. Ici, le système eLoran, décrit dans l'appendice précédent, mérite d'être mentionné.

Ces **technologies émergentes** se distinguent des technologies décrites dans les appendices précédents par les caractéristiques suivantes:

- elles sont conçues dans le cadre d'une offre combinée ou d'une approche de fusion de capteurs;
- en plus de fournir une position, elles créent une distribution horaire efficace, même si certaines peuvent avoir besoin d'une connexion à l'UTC;
- elles s'appuient sur des pratiques modernes en matière de développement de matériel et de logiciels, ce qui entraîne un développement rapide et des mises à jour par voie aérienne. Cela signifie également que toutes les unités sont connectées et n'ont généralement pas besoin d'une intervention manuelle après l'installation;
- elles disposent de capacités autonomes de surveillance, de détection et de signalement des défauts;
- elles affichent des améliorations en matière de cybersécurité, d'intégration avec d'autres systèmes, d'expérience des utilisateurs et de flexibilité.

De plus amples informations sur ces technologies, y compris une description des algorithmes examinés dans la présente section, sont disponibles dans le document suivant: [Position, navigation, and timing technologies in the 21<sup>st</sup> century: Integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications, Y. J. Morton, F. S. T. Van Diggelen, J. J. Spilker et B. W. Parkinson, Wiley/IEEE Press.](#)

### 5.3.1 White Rabbit (WR)

Le profil haute précision IEEE 1588-2019, largement connu sous le nom de «[protocole White Rabbit](#)», est un **protocole de distribution du temps et de fréquences** développé par le CERN qui combine des paquets PTP et la base de fréquence Synchronous Ethernet (SyncE) pour fournir une **précision de transfert du temps sous la nanoseconde**. Une nouvelle version PTP 2.1 inclut le protocole White Rabbit généralisé en tant que profil haute précision.

Cette technologie est mise au point par des entreprises commerciales qui proposent du matériel et des logiciels comme solution de datation en tant que service (TaaS). Elles offrent également des capacités de surveillance et de résilience, en mettant l'accent sur:

- le basculement sans interruption entre les sources de synchronisation en cas de défaillance;
- la détection et l'avertissement des écarts d'une source de synchronisation par rapport aux spécifications, permettant ainsi le basculement vers une source de synchronisation valable.

#### 5.3.1.1 Caractéristiques principales

Cette technologie nécessite au moins deux sources de synchronisation (GNSS, horloge atomique, INM, etc.) dans le réseau de fibre optique ininterrompu. Ces sources de synchronisation sont complémentaires les unes des autres pour assurer le transfert du temps et de fréquences à une précision sous la nanoseconde, en picosecondes, en cas de défaillance de l'une d'entre elles. Les essais en laboratoire du JRC ont démontré une précision d'environ 60 à 90 picosecondes de pic à pic.

Les réseaux White Rabbit existants, comme [GEANT](#), ont été mis en place pour soutenir dans toute l'Europe les efforts scientifiques au moyen de technologies adoptées par différents instituts de recherche tels que le CERN et le GSI pour la physique des hautes énergies (accélérateurs de particules), ainsi que de plateformes distribuées d'astronomie telles que HISCORE, CTA, SKA, KM3Net, etc. On compte aussi parmi les utilisateurs actifs des centres de données, des entreprises de télécommunications et des établissements financiers, tels qu'[Equinix](#) ou [Deutsche Börse](#).

#### 5.3.1.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

Cette **technologie est arrivée à maturité**, tandis que des recherches supplémentaires sont menées dans deux domaines:

- l'extension de White Rabbit en tant que service de surveillance par voie aérienne. Dans ce mode, le système surveille et corrige d'autres appareils, en cas de dérive de la source de synchronisation, en utilisant le signal radio qu'ils émettent. Les résultats des [essais du JRC](#) ont démontré que les appareils externes peuvent être maintenus dans des limites de  $\pm 200$  nanosecondes;
- l'utilisation du mode de surveillance par voie aérienne de White Rabbit en tant que solution PNT complète. Une infrastructure de synchronisation dense est nécessaire à cette fin, mais celle-ci n'est pas encore disponible. Un [projet pilote de SuperGPS de l'Université de technologie de Delft](#) devrait obtenir une précision de positionnement de 10 centimètres sur la base d'une synchronisation sur le temps du réseau prévue au niveau de 100 picosecondes. Ce concept pourrait donner des services de positionnement à l'intérieur comme à l'extérieur. Il est destiné à des applications de transport intelligentes, notamment dans les zones urbaines denses et dans les tunnels, pour le maintien dans la voie des voitures autonomes.

### 5.3.2 Distribution horaire sur réseau informatique

L'une des options pour la **distribution horaire sur réseau informatique** est le mode de transmission synchrone dynamique (DTM), qui comprend un multiplexage temporel et une technologie de réseau optique de commutation de circuits. Cette technologie, conçue pour fournir une qualité de service (QoS) garantie pour les services de vidéo en flux continu, peut également être utilisée pour les services de transmission par paquets. L'architecture DTM a été normalisée par l'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI) en 2001.

Cette technologie est utilisée par plusieurs entreprises pour la distribution horaire sur un réseau. Les entreprises utilisent les normes DTM, même si certaines ont créé un protocole de datation supplémentaire pour améliorer l'intégrité des informations de synchronisation transmises (NTP STS). La surveillance du réseau permet d'enregistrer le temps et de renforcer la cybersécurité. Dans l'ensemble, deux types de services sont proposés:

- installation du matériel et entretien (suivi) ultérieur du réseau, tandis que le réseau proprement dit est géré par le client;
- solution de datation en tant que service (TaaS), l'entreprise gérant elle-même le réseau et proposant une solution clé en main au client.

Un réseau existant est utilisé moyennant le seul ajout matériel de boîtiers de réseau (nœuds) qui redistribuent le temps par DTM à tous les voisins. Les boîtiers s'interconnectent directement ou par l'intermédiaire de liaisons WAN commercialement disponibles, y compris les liaisons en fibre optique, WDM, MPLS et micro-ondes. Le réseau mis à jour offre redondance et résilience face aux défaillances des voies ou des nœuds. La mise en œuvre peut se faire à l'échelle d'un pays, avec comme solution de repli les horloges atomiques, en incluant la source de synchronisation (généralement les GNSS, mais d'autres moyens sont également possibles).

#### 5.3.2.1 Caractéristiques principales

La **précision dépend de l'asymétrie de gigue (jitter) et du réseau**. Le premier facteur est directement lié à l'intensité des autres trafics non liés. Il peut être atténué par l'augmentation du taux des paquets pour détecter plus souvent les retards, ce qui nécessite une bande passante garantie. L'expérience pratique montre que demander la qualité correcte au réseau MPLS est essentiel et suffisant pour obtenir une précision sous la microseconde, même si cela peut s'avérer coûteux.

Le deuxième facteur **nécessite l'étalonnage de chaque nouvelle voie**. Cela nécessite à son tour une conception minutieuse du budget d'erreur et un équilibre entre le nombre de nœuds installés. Chaque nœud assure la surveillance et l'autoétalonnage des liaisons qui se chevauchent. Compte tenu du coût, les efforts pour maintenir la précision pourraient se concentrer sur les principaux éléments sur lesquels reposent d'autres connexions gérées selon le principe du service «au mieux», pour autant que ces connexions ne soient pas trop longues (ce qui limite à la fois le nombre de voies possibles et l'effet du trafic). Les résultats des essais du JRC laissent également entendre que l'étalonnage sur le «réseau au mieux» en utilisant les GNSS comme sources de synchronisation n'est pas suffisant pour maintenir un service fiable.

#### 5.3.2.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

Les normes DTM sont conçues pour les services de vidéo en flux continu, de sorte que l'application de synchronisation requiert des surcoûts au niveau matériel qui pourraient ne pas être nécessaires. Il serait logique de supposer que des protocoles et du matériel simplifiés pour la synchronisation uniquement pourraient être utilisés à l'avenir. Certaines des solutions actuelles utilisent des liaisons micro-ondes et celles-ci devraient augmenter, limitant les coûts d'infrastructure.

Des réseaux commerciaux fondés sur cette technologie sont déployés pour plus de 15 transmissions DVB-T/DAB nationales ou régionales. Les activités de développement actuelles sont axées sur les mises à niveau sur le plan de la taille, des interfaces et de l'extensibilité, l'objectif étant de créer un produit plus spécialisé, adapté à un marché particulier et proposé sur différents types de liaisons. Les opérateurs adoptent séparément des moyens n'utilisant pas les GNSS pour transférer et conserver la référence temporelle UTC.

### 5.3.3 Pseudolites

Un pseudolite est une **technologie de positionnement terrestre** qui utilise un **réseau d'émetteurs au sol** fournissant un signal de radiopositionnement solide sur une zone donnée.

Le premier prototype connu est l'essai de mise à l'épreuve du concept GPS sur le terrain d'essai de Yuma réalisé au début des années 1970. Le signal était transmis à l'aide d'émetteurs terrestres et de récepteurs rovers embarqués à bord d'un aéronef, inversement à la manière d'utiliser le système aujourd'hui. Les codes Gold PRN 33 à 37 du système GPS étaient réservés à un usage terrestre mais, avec l'augmentation de la disponibilité des satellites, la priorité s'est déplacée de la disponibilité et de la précision vers l'intégrité et les préoccupations liées à la transmission d'autres signaux sur la fréquence GPS. À l'heure actuelle, si les pseudolites peuvent encore utiliser un code Gold, ils utilisent généralement des fréquences différentes, principalement pour éviter d'éventuelles restrictions à l'avenir. Deux exemples récents sont les fréquences WiFi et la bande dédiée de 921,8845 à 927,0000 MHz avec des puissances d'émission variables, de 23 dBm pour les premières et de 30 watts pour la seconde, nécessitant des autorisations spécifiques.

Le réseau est synchronisé au niveau de la nanoseconde pour **fournir un positionnement et une synchronisation**. Il existe deux solutions: l'utilisation d'oscillateurs précis (tels que des horloges atomiques) ou la synchronisation interne (par alignement de fréquence).

Les pseudolites sont couramment utilisés soit de manière indépendante, soit en tant que renforcement d'un GNSS, et ils sont généralement construits avec du matériel GNSS, ce qui permet la réutilisation du matériel et des corrélateurs des récepteurs GNSS. En raison des différences de fréquences, dans la pratique, les récepteurs intégrés sont généralement au nombre de deux.

#### 5.3.3.1 Caractéristiques principales

Toute technologie de positionnement terrestre est confrontée, entre autres facteurs limitatifs, à la propagation multivoie, à l'effet proche-lointain et au retard troposphérique. L'accès multiple par répartition en code en séquence directe/à saut de temps (TH/DSCDMA), la séparation du signal en distance et en fréquence, l'application d'un schéma particulier d'impulsion et l'utilisation d'une antenne de formation de faisceau résistant à la propagation multivoie sont des exemples de mesures d'atténuation destinées à garantir un positionnement de précision centimétrique. La conception du matériel suit en général celle des récepteurs GNSS et inclut des horloges OXCO.

La **plage de fonctionnement**, limitée par l'horizon proche, l'effet proche-lointain et les réglementations existantes en matière de spectre, est de 5 à 15 kilomètres. Les applications de synchronisation de précision et de fréquences nécessitent simplement qu'un seul émetteur soit visible, tandis que le positionnement et la navigation ont besoin de signaux provenant de trois points d'émission ou plus. La densité du réseau dépend de la visibilité, un environnement urbain encombré nécessitant la densité la plus élevée. Dans le cas d'une portée d'émetteur normale dans un environnement suburbain encombré, il faut environ quatre balises par 100 km<sup>2</sup> (10 x 10 kilomètres). Les études propres au site doivent tenir compte des exigences des utilisateurs et de la disponibilité du signal, ce qui augmentera le nombre d'émetteurs.

Un aspect important à prendre en considération est le fait qu'une légère différence de hauteur rend le système beaucoup plus précis en planaire que sur le plan horizontal. L'utilisation de systèmes de plateformes à haute altitude (HAPS) se déplaçant à des altitudes pouvant atteindre 20 kilomètres pourrait résoudre ces deux problèmes. Il s'agit de plateformes de capteurs et de fournisseurs de services de communication conçus pour survoler une zone donnée pendant de longues périodes en utilisant l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Les contraintes en matière de consommation d'énergie limitent leur charge utile. À l'heure actuelle, leur principal objectif est le déploiement rapide de communications avec une infrastructure minimale de réseau au sol, par exemple pour remplacer des réseaux terrestres endommagés par une catastrophe. Leurs caractéristiques en font des systèmes de renforcement idéaux pour un système de pseudolites, mais il faudrait modifier le corrélateur (partie de l'extrémité avant du récepteur) pour tenir compte de leurs déplacements. Certains fabricants déploient des capteurs de pression pour atténuer les problèmes liés à l'altitude. Si cela permet de renforcer les **systèmes fondés sur des mesures de codes**, qui fournissent une **précision de 5 à 10 mètres**, il n'en



va pas de même pour les systèmes fondés sur la résolution de l'ambiguïté **de la porteuse**, qui garantissent une **précision millimétrique**.

Les essais au JRC ont démontré les performances suivantes:

- un transfert du temps interne et externe (par rapport à l'UTC) de 0,2 à 15 nanosecondes;
- un positionnement cinématique en 2D à l'extérieur et à l'intérieur de 10 à 15 mètres avec code, et de 5 à 11 millimètres sur la base de la porteuse et d'une antenne V-Ray;
- un transfert du temps par voie aérienne à plusieurs sauts sur 106 kilomètres, avec une précision de 0,7 nanoseconde de pic à pic.

### 5.3.3.2 *Situation actuelle et plans d'optimisation*

Ces technologies sont à l'essai et utilisées actuellement dans l'extraction minière, les essais automobiles, la logistique intérieure et les opérations portuaires et en port à sec. Compte tenu de leurs performances, elles sont envisagées pour les systèmes de transport intelligents ainsi que pour le décollage et l'atterrissage verticaux, mais elles n'ont pas encore été mises en œuvre.

Leur développement se concentre sur les performances du corrélateur et sur les caractéristiques des antennes. Du fait de l'augmentation des volumes d'unités expédiées, certains producteurs indiquent que la miniaturisation sera la prochaine étape.

Une autre technologie intéressante est celle de l'**ultra large bande (Ultra Wideband — UWB)**, utilisée pour transmettre des impulsions à haute fréquence sur de courtes distances. En utilisant la large bande passante, cette technologie est, dans une certaine mesure, résiliente à la propagation multivoie et convient à un positionnement à l'intérieur sans visibilité directe. Des unités commerciales ont fait l'objet de démonstrations pour les services d'urgence mais, malheureusement, deux facteurs ont limité leur attrait commercial:

- leur [portée extérieure limitée](#);
- leurs [exigences en matière d'autorisations](#).

Cette idée a récemment été réexaminée lors de l'entrée sur le marché d'appareils à faible puissance, offrant toujours une précision décimétrique, et Apple a récemment introduit cette technologie dans ses appareils mobiles. Toutefois, de manière générale, l'utilisation de l'UWB semble être limitée aux appareils d'intérieur et aux appareils mobiles.

### 5.3.4 PNT fondé sur les réseaux 5G et cellulaires

En 2012, le secteur des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT-R) a lancé pour les télécommunications mobiles internationales (IMT) le [programme «IMT à l'horizon 2020 et au-delà»](#) dans le but de définir la cinquième génération des systèmes de communications mobiles, communément appelée la «5G». En juin 2016, le groupe de travail 5D de l'UIT-R a publié un calendrier pour le programme IMT-2020 ([Illustration 55](#)). Depuis lors, les parties prenantes de l'industrie et du monde universitaire, telles que le 3GPP, le Forum DECT, l'initiative IMT-2020 de la Corée, l'initiative IMT-2020 de la Chine, etc., collaborent au sein de diverses enceintes internationales.

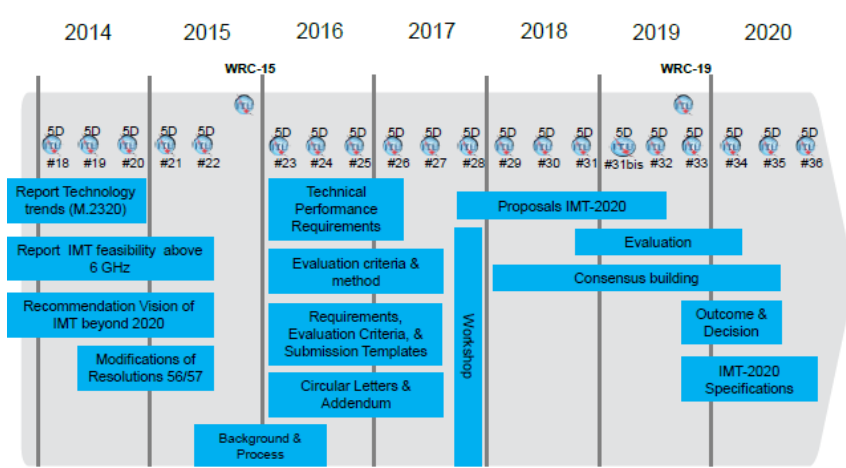


Illustration 55 — Calendrier et processus du programme IMT-2020 (source: UIT-R)

D'octobre 2017 à juin 2019, des technologies candidates ont été soumises et quatre technologies ont été officiellement considérées comme répondant aux spécifications du programme IMT-2020:

- 3GPP 5G-SRIT (Set of Radio Interface Technologies — ensemble de technologies d'interface radio) et 3GPP 5G-RIT (Radio Interface Technology — technologie d'interface radio), les modèles de déploiement 5G autonomes et non autonomes bien connus de la technologie de communication cellulaire du projet de partenariat de 3<sup>e</sup> génération (3GPP);
- la technologie 5Gi, mise au point par l'organisme de développement des normes de télécommunications en Inde (TSDSI). Il s'agit d'une version actualisée de 3GPP 5G-RIT, conçue essentiellement pour améliorer la couverture en zone rurale;
- la technologie DECT 5G-SRIT, une technologie non cellulaire autonome et décentralisée destinée à couvrir toute une série de cas d'utilisation — de la téléphonie sans fil et la diffusion audio en flux continu aux applications industrielles de l'internet des objets (IdO), en particulier dans les villes intelligentes.

Sur les quatre technologies susmentionnées, **la 5G du 3GPP (dans ses modes de fonctionnement tant autonomes que non autonomes) est la technologie la plus populaire et la plus largement déployée** au monde pour le programme IMT-2020.

L'infrastructure de réseau permettant de relayer la voix et les données entre les utilisateurs finaux et l'internet est communément appelée «réseau d'accès radio», «réseau de transport» ou «réseau central». **La prise en charge de la localisation des utilisateurs dans l'infrastructure de réseau est une exigence essentielle pour le fonctionnement normal des réseaux cellulaires**, en particulier lors des procédures de localisation de l'appelé (réception d'un appel/flux de données entrant — *paging*) et de transfert intercellulaire (transition entre stations de base voisines en raison de la mobilité des utilisateurs — *handover*). Étant donné qu'il existe actuellement plus d'appareils mobiles en service que d'humains dans le monde, les capacités de communication et de positionnement des réseaux et appareils mobiles commerciaux sont très importantes.

#### 5.3.4.1 Caractéristiques principales

L'[Illustration 56](#) montre l'**architecture de positionnement de la technologie 5G New Radio (NR)**. Le processus de positionnement commence lorsqu'un client externe envoie une requête visant à obtenir la position de l'équipement utilisateur (User Equipment — **UE**). Une fonction de gestion de la localisation (Location Management Function — **LMF**) traite la requête et reçoit des relevés et des informations d'assistance du réseau d'accès radio de nouvelle génération (Next Generation Radio Access Network — **NG-RAN**) et de l'UE. La LMF

estime la position de l'UE et envoie la position estimée au client à l'origine de la requête. Contrairement à ce qui se passe avec la 4G, le positionnement de l'UE peut être estimé également sur l'UE lui-même, et non seulement par le réseau. Une autre caractéristique intéressante de la 5G est le fait que la requête de positionnement débute et s'achève dans le client du service de localisation, qui peut correspondre à l'UE ou non.

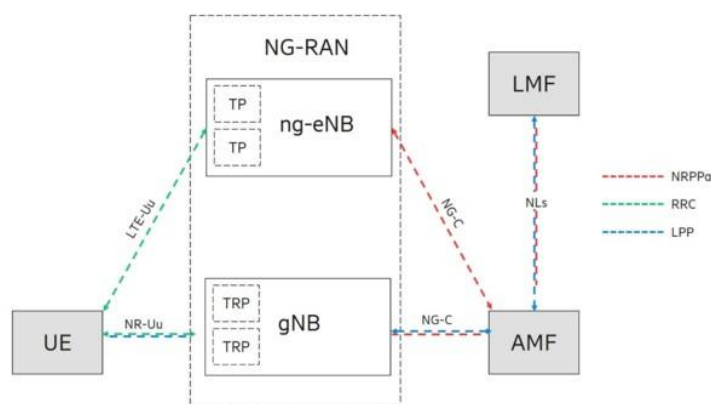


Illustration 56 — Architecture de positionnement de la technologie 5G (source: [Ericsson](#))

L'estimation la plus élémentaire de la localisation de l'utilisateur consiste à identifier la station de base qui dessert le téléphone cellulaire et à connaître son emplacement et sa zone de couverture. Pour améliorer les performances, il est possible de procéder à une triangulation à l'aide d'un signal (distance) provenant de trois stations de base adjacentes ou plus. Les réseaux LTE prennent également en charge le positionnement sur la base de la différence de temps d'arrivée observée, une approche semblable à celle suivie par le système eLoran décrit dans la section précédente.

#### 5.3.4.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

L'évolution des réseaux de communications mobiles, qui se traduit par la **miniaturisation des cellules**, l'**augmentation des débits de données** et l'**utilisation de fréquences plus hautes et de faisceaux plus étroits**, entraînera une amélioration de la précision de la solution de positionnement. La première version des réseaux 5G est déjà opérationnelle en Europe, en particulier le réseau non autonome, lequel utilise essentiellement le réseau central 4G LTE existant. Les capacités du réseau non autonome sont dès lors limitées par rapport à celles du réseau purement autonome de la 5G. Par exemple, le réseau non autonome prend en charge le positionnement LTE plutôt que le positionnement natif 5G NR. Cette plateforme permet l'utilisation d'une solution hybride associant un signal synchronisé dans le temps GNSS et 5G pour répondre à l'exigence de positionnement imposée par la Commission fédérale des communications des États-Unis dans le cadre du service 911 amélioré (E-911).

La technologie de réseau autonome est plus mature et les progrès technologiques permettront de tirer pleinement parti des capacités de la 5G, telles qu'une large bande passante pour une meilleure résolution temporelle, de nouvelles bandes de fréquences dans la gamme mmWave et un MIMO massif pour une mesure d'angle précise.

De plus en plus de bancs d'essai 5G reposant sur la technologie de réseau autonome sont opérationnels dans le monde entier. Par exemple, lors du Mobile World Congress de 2022, Qualcomm Technologies a présenté un [positionnement précis exploitant le spectre mmWave](#) pour des déploiements en intérieur et en extérieur, par exemple dans les usines intelligentes. [Rohde & Schwarz a fait la démonstration d'un système complémentaire aux GNSS fondé sur la technologie de radiodiffusion 5G<sup>10</sup>](#). Les signaux de référence de positionnement sont transmis en même temps que des informations sur l'emplacement des émetteurs. Cette infrastructure terrestre utilisant les antennes-relais de la 5G sert de solution de repli par rapport aux GNSS. Elle transmet le même signal simultanément à une multitude de récepteurs mobiles et fixes (téléphones intelligents, tablettes, voitures ou équipements portables, par exemple) et permet d'obtenir une précision métrique. En outre, le contenu diffusé par les émetteurs 5G peut être amélioré par des corrections RTK et PPP pour obtenir une précision centimétrique.

<sup>10</sup> La radiodiffusion 5G repose sur la technologie 3GPP utilisée pour les réseaux cellulaires 4G et 5G en réutilisant les solutions de déploiement de radiodiffusion déjà en place (par exemple, radio, télévision, etc.). Elle permet la réception mobile de contenus audiovisuels au moyen d'un mode de radiodiffusion très efficace.

### 5.3.5 Ranging Mode (R-Mode)

Le Ranging Mode (R-Mode) est un système de positionnement terrestre qui **utilise les bandes de fréquences de l'infrastructure radio maritime existante** pour la **fourniture de signaux de synchronisation**. Des signaux provenant d'au moins trois émetteurs indépendants doivent être reçus pour qu'un positionnement selon ce mode soit possible. Actuellement, les bancs d'essai du R-Mode en Europe, en Asie et en Amérique du Nord utilisent:

- la bande des moyennes fréquences (MF) du système de balises radio maritime, ou
- la bande des très hautes fréquences (VHF) marines du système d'échange de données en ondes métriques (VDES).

Le système de radionavigation se compose de **trois éléments**:

- un émetteur R-Mode, qui utilise l'infrastructure radio maritime existante moyennant une mise à niveau permettant la transmission de signaux modifiés en cas de MF ou de messages spécifiques en cas de VHF (directive 1158 de l'IALA) en plus du service en place de cette infrastructure;
- des unités de surveillance R-Mode, qui sont mises en œuvre en champ proche ou en champ lointain, dans les zones de services du côté de l'émetteur. Elles surveillent les performances et la disponibilité du service R-Mode et génèrent des informations supplémentaires pour en améliorer l'efficacité;
- un centre de commandement et de contrôle, qui n'a pas encore été implanté dans les bancs d'essai.



Illustration 57 — Ranging Mode (source: [R-Mode Baltic](#))

Le R-Mode peut également desservir une petite région, comme un port, et servir de solution de repli pour les approches portuaires. Dans ce cas, au moins trois émetteurs doivent être utilisés et le service R-Mode sera disponible dans l'espace commun où se superposent les zones de services. Pour élargir la zone de service du R-Mode, des émetteurs MF et VDE supplémentaires doivent diffuser ce service. Les émetteurs des stations MF et VDES ont des portées et des propriétés différentes. Une combinaison est idéale pour les exploiter avec succès et obtenir une bonne géométrie.

En général, une mise en œuvre à l'échelle de l'UE ou à l'échelle mondiale devrait viser à aider les navires, en tant que solution de repli, lorsque ceux-ci se trouvent dans des zones côtières durant leur voyage de quai à quai, à l'exclusion des zones proches de la côte. Dans ce cas, il est nécessaire que les fournisseurs de services R-Mode des différents pays coopèrent pour permettre à l'utilisateur maritime d'utiliser les signaux de ces différents fournisseurs en même temps.

Une mise en œuvre à grande échelle serait bénéfique pour les utilisateurs du secteur maritime, notamment pendant les phases critiques du voyage. Pour exploiter pleinement le potentiel du R-Mode, il serait nécessaire d'harmoniser les systèmes et services R-Mode des différents fournisseurs nationaux de services maritimes afin d'en permettre la prise en charge dans les zones internationales. Un cadre de normes et de lignes directrices pour le R-Mode et un groupe international de coordination R-Mode seraient alors nécessaires.

### 5.3.5.1 *Caractéristiques principales*

Les analyses théoriques, les simulations et les campagnes de mesure montrent qu'en fonction de la distance, de la puissance du signal (ou du rapport signal sur bruit) et de la géométrie des sites des utilisateurs mobiles et des émetteurs, le système peut offrir une **précision de positionnement nettement meilleure que 100 mètres**, même si les performances ne seraient pas aussi bonnes pendant la nuit. Les optimisations du réseau de transmission amélioreraient ces performances, mais il n'est pas possible de déterminer si une précision de 10 mètres peut être atteinte (il convient de signaler que la performance de positionnement horizontal proposée pour une solution de repli par rapport aux GNSS est de 10 mètres pour les approches portuaires et les eaux restreintes, et de 100 mètres pour les eaux côtières — [recommandation R0129 de l'IALA relative à la vulnérabilité des GNSS et aux mesures d'atténuation](#)).

Par conséquent, le R-Mode est conçu pour **couvrir les eaux côtières et les eaux restreintes**, qui sont normalement exposées au risque le plus élevé d'une dégradation des signaux GNSS due à des interférences intentionnelles ou non intentionnelles. Contrairement aux GNSS, qui couvrent le monde entier, le R-Mode ne peut pas atteindre une couverture mondiale en raison de la portée limitée des signaux MF et VHF. En ce qui concerne le R-Mode utilisant des signaux MF, le problème des interférences affectant la propagation ionosphérique, qui dégrade les performances du système pendant la nuit, n'a pas encore été résolu. Une difficulté pour le R-Mode utilisant le VDES réside dans la charge des canaux causée par le nombre d'émetteurs présents dans une zone. En outre, le problème de la colocalisation des installations R-Mode VDES et des installations AIS existantes doit être résolu.

### 5.3.5.2 *Situation actuelle et plans d'optimisation*

Le R-Mode se trouve à un **stade précoce de développement de la technologie fondamentale** et du matériel de base dans plusieurs bancs d'essai permanents ou temporaires en Europe, en Amérique du Nord et en Asie. Dans le même cadre, des prototypes d'émetteurs R-Mode ont été mis au point et sont utilisés dans les bancs d'essai du R-Mode; leur niveau de maturité technologique (TRL) est actuellement compris entre 4 et 5. Du côté des navires, des plateformes de recherche sont actives. Des modèles de récepteurs R-Mode ont été développés, mais des activités plus poussées sont nécessaires pour permettre un positionnement fondé sur le R-Mode.

À l'instar des GNSS, le R-Mode peut fournir une position absolue, quoiqu'avec une précision moindre et une disponibilité géographique limitée à quelque **250 kilomètres des côtes**. Le R-Mode devrait être une technologie candidate pour la composante terrestre souhaitée décrite dans la norme de performance de l'OMI sur les récepteurs de radionavigation multisystèmes de bord (MSC.401 de l'OMI, telle que modifiée).

Le R-Mode dépend actuellement des GNSS pour la synchronisation. Les plans pour l'avenir envisagent l'inclusion d'horloges atomiques pour la resynchronisation à court terme et, éventuellement, d'autres sources de synchronisation de repli, même si cette mise en œuvre est difficile.

La **normalisation du R-Mode est en cours**. À présent que les exigences applicables au R-Mode ont été reconnues dans la nouvelle norme relative aux VDES (recommandation UIT-R M.2092-1) et dans la directive 1158 de l'IALA sur le VDES, les premiers documents concernant le R-Mode sont disponibles. D'autres travaux sont en cours au sein de l'IALA pour élaborer une directive concernant la mise en œuvre du R-Mode utilisant des transmissions dans les bandes de fréquences MF et VHF. En outre, les messages de navigation qui devraient faire partie des messages de données RTCM sont en cours d'élaboration. Selon une feuille de route convenue au niveau international, la normalisation ne devrait pas être achevée avant 2027.

### 5.3.6 Navigation visuelle

La navigation visuelle (ou navigation par images) se répand de plus en plus à mesure que les prix du matériel baissent (les caméras des téléphones portables coûtent moins d'1 EUR) et que les algorithmes arrivent à maturité. La présente section examinera la **navigation par images** et la **navigation lidar**, ces deux technologies étant très populaires, d'abord dans les appareils mobiles et ensuite dans les voitures autonomes. Bien que très efficaces **tant à l'intérieur qu'à l'extérieur**, ces technologies **ne** fournissent aucune **information de synchronisation**, de sorte que leur utilisation devrait se faire dans le cadre de la fusion de capteurs, probablement en association avec les GNSS et des unités de mesure inertielle.

#### 5.3.6.1 Caractéristiques principales

Une **image** est une projection en deux dimensions d'un monde en trois dimensions, ce qui signifie que, contrairement à la technologie lidar examinée plus loin, elle ne donne aucune information sur la profondeur. Pour remédier à l'absence de cette dimension, il est nécessaire d'identifier un même point sur plusieurs images (pour créer ainsi une ligne de base en mouvement d'une longueur connue), comme le montre l'[Illustration 58](#).

L'identification et la mise en correspondance des mêmes caractéristiques d'une image à l'autre, en faisant abstraction des changements de lumière et de la dynamique de la caméra, constituent la plus grande difficulté pour ce type de navigation. Il peut s'agir là d'un obstacle pour l'aviation. Dans le cas d'une utilisation au sol ou à pied, ce problème est simplifié car les déplacements et les rotations sur l'axe des hauteurs sont limités, et il a été démontré que cette technologie donne des résultats fiables. Si un algorithme de mouvement simple est utilisé, il est possible d'exploiter dans la pratique tout élément bien éclairé, voire un motif qui se répète. Dans le cas de l'aviation, les informations d'une unité de mesure inertielle sont essentielles.

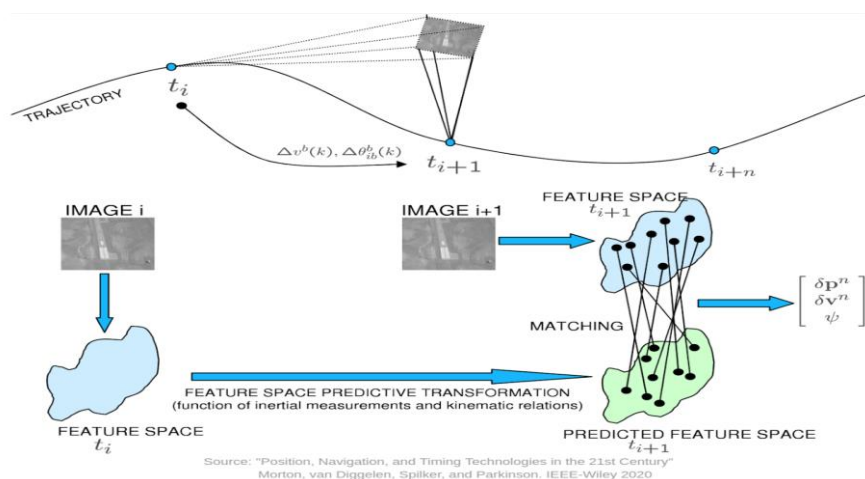


Illustration 58 — Vue d'ensemble de la fusion de capteurs aidée par l'imagerie et une unité de mesure inertielle (source: pnt21book.com)

La technologie **lidar** permet de déterminer la distance par rapport à un objet en mesurant le temps que met la lumière réfléchiée pour retourner au récepteur. Elle est couramment utilisée pour la création de modèles et de cartes à haute résolution. Elle **peut** également **servir à la navigation**, selon l'une des deux approches suivantes:

- **l'approche ne tenant pas compte des éléments caractéristiques**, lorsque la distribution géographique des relevés (nuage de points) est utilisée directement pour la comparaison avec les données existantes. La difficulté sur le plan des algorithmes réside dans la sous-sélection des points à mettre en correspondance (détermination de la zone de superposition). La sélection est ensuite utilisée pour la meilleure correspondance dans les données de référence et est optimisée (par rotation) afin de réduire le plus possible la fonction de coût (erreur d'ajustement). La détermination de la zone à comparer est essentielle pour optimiser la recherche. Les premières position et orientation connues sont très utiles;
- **l'approche fondée sur les éléments caractéristiques**, ces derniers étant d'abord identifiés et extraits des données (nuage de points). La navigation consiste ensuite à les identifier et à les utiliser pour



l'estimation de la position. Ces éléments caractéristiques sont généralement beaucoup plus simples que les objets descriptifs d'origine humaine et sont habituellement des points ou de simples éléments géométriques. Après l'extraction, le mouvement perçu entre ces éléments caractéristiques et le scanner (l'utilisateur) peut être utilisé pour l'estimation du mouvement, de l'orientation et de la position.

### 5.3.6.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

La mécanisation (l'intégration) de l'assistance fournie par la **navigation lidar** avec un compteur kilométrique ou une unité de mesure inertielle est possible. C'est souvent le cas lors de la [SLAM \(localisation et cartographie simultanées\)](#), les données collectées pouvant être utilisées pour améliorer les cartes existantes. La technologie lidar peut être utilisée pour la navigation en véhicule ou à pied. Les **méthodes optiques** présentent des caractéristiques similaires.

Dans les deux cas, un algorithme SLAM récurrent est très populaire en raison de sa rapidité et de son efficacité. La position est estimée de manière relative, mais si certains des éléments caractéristiques ont des positions connues, le mouvement de l'objet peut également être cartographié par rapport au repère de référence mondial. Lorsque le même endroit est revisité (boucle fermée), la précision du positionnement peut être estimée et l'estimation précédente corrigée si nécessaire.

Une autre méthode est celle du [filtre particulaire](#), qui utilise une approche probabiliste pour estimer la position tandis que l'objet se déplace jusqu'à ce que la position puisse être fournie avec un degré de confiance suffisant.

Il convient de tenir compte de plusieurs éléments pour la navigation visuelle:

- un volume important de données est produit, de sorte que les données sont tout d'abord réduites par l'identification par sous-échantillonnage des zones d'intérêt spécifiques. Il s'agit également d'éliminer les données aberrantes, telles que les véhicules en mouvement ou les piétons. Ensuite, la plupart des algorithmes fonctionnent par itération pour parvenir aux minima locaux;
- la navigation visuelle est différente pour distinguer l'incertitude d'observation de la mesure de la distance et de la mesure de l'angle. Dans le cas de la technologie lidar, cela dépend de l'angle et de la surface réfléchie; pour une image, cela dépend des lentilles et des conditions lumineuses;
- l'intégration avec d'autres capteurs nécessite une préparation minutieuse, notamment la stabilité et l'estimation du bras de levier.

Le [viseur d'étoiles](#) et le [capteur solaire](#) sont des applications de ces principes dans le domaine spatial. Ces deux appareils utilisent la **navigation astronomique** pour comparer des vues connues des étoiles à l'aide de photocellules ou d'une caméra. Cette méthode nécessite une visibilité claire des étoiles, c'est-à-dire un ciel nocturne pour un utilisateur terrestre, et est principalement utilisée dans les plateformes spatiales, pour fournir à la fois un positionnement et une orientation en cas d'utilisation combinée avec une unité de mesure inertielle.

Cette technologie est utilisée dans pratiquement toutes les missions spatiales. En général, une mission compte à la fois un viseur d'étoiles et un capteur solaire. Ce dernier est tout d'abord utilisé pour une détermination d'attitude approximative, généralement après la séparation du véhicule spatial et du lanceur. Le viseur d'étoiles est utilisé pour une détermination d'attitude plus précise, et les données indiquées par l'unité de mesure inertielle pour l'approche de la fusion de capteurs, afin d'obtenir une orientation et une position fluides.

La précision du capteur solaire est de 3 à 0,005° et celle du viseur d'étoiles est de 0,01 à 0,0003°. Le capteur peut être soit un traceur, soit un scanner, adapté aux véhicules spatiaux en rotation rapide. Cette méthode exige un préfiltrage pour éliminer le bruit, tel que les lumières parasites ou les reflets, et éviter l'aveuglement par le soleil ou par la lune et nécessite une stabilisation des relevés (ce à quoi sert l'unité de mesure inertielle).

Grâce à l'amélioration de la qualité des composants et à leur taille plus réduite, la technologie simplifiée est [utilisée pour les satellites en LEO](#) et est explorée pour les missions CubeSat. Outre les solutions commerciales, il existe un [algorithme open source](#), qui est utilisé pour les plateformes CubeSat. Les relevés sont effectués dans le [système de référence céleste](#), ce qui nécessiterait une conversion pour l'ITRF des GNSS ou des systèmes de référence semblables.

### 5.3.7 Navigation mobile

Le téléphone intelligent a succédé aux appareils de navigation ad hoc de TomTom ou de Garmin, ainsi qu'aux cartes papier, pour devenir désormais la principale source de navigation. En 2020, on comptait dans le monde plus de [4 milliards de téléphones intelligents compatibles avec les GNSS](#). Il est donc intéressant de constater que cette compatibilité avec les GNSS existe presque par hasard. [En 1999, la Commission fédérale des communications des États-Unis a imposé une exigence de positionnement dans le cadre du service 911 amélioré \(E-911\)](#). La triangulation fournie par le réseau d'antennes-relais de téléphonie mobile n'était pas suffisamment précise. En remplacement, un positionnement à l'aide d'une puce GPS a été proposé.

Le **téléphone portable n'a pas été conçu pour servir de récepteur GNSS/GPS**. Il contient une simple antenne monopôle en F inversé, une antenne polarisée linéairement à faible gain et à faible suspension de bruit. Il comporte une horloge de faible qualité et est propice aux auto-interférences du fait du placement de ses composants. Pourquoi ces considérations sont-elles importantes? Le positionnement par GNSS repose sur la différence de temps par rapport au satellite (un oscillateur local stable est donc important) mesurée avec un signal de très faible puissance, souvent en dessous du plancher de bruit (des bonnes antennes sont dès lors essentielles). En soi, **un téléphone intelligent est faiblement performant en tant que récepteur GNSS**.

Le **système GPS assisté (A-GPS)** élimine ces failles en augmentant la sensibilité et le délai d'obtention de la première position (TTFF), les données assistées réduisant l'espace de recherche de fréquence, mais pas l'espace de retard. En outre, l'architecture des puces est modifiée et repose sur une capacité de recherche parallèle massive. Étant donné que le principal facteur limitatif de la puce est la taille de sa mémoire, afin de réduire le plus possible toutes les hypothèses parallèles, les fabricants recherchent d'abord une constellation GNSS (généralement, le système GPS avec des codes courts) et, une fois la constellation acquise, la puce procède à une recherche de synchronisation plus affinée pour obtenir des codes plus longs d'autres GNSS. En ce qui concerne Galileo, la puce recherche la composante de données Galileo (E1B - OSNMA) uniquement au début de la requête de localisation; une fois que les données ont été obtenues, la puce commence à rechercher le code pilote. Des informations techniques sont disponibles dans l'ouvrage [F. van Diggelen, A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS. Artech House, 2009.](#)

#### 5.3.7.1 Caractéristiques principales

La compatibilité avec les GNSS est assurée par l'architecture A-GPS (A-GNSS). En outre, il convient de souligner deux avancées récentes, toutes deux décrites du point de vue d'Android car l'approche d'Apple n'est pas bien documentée.

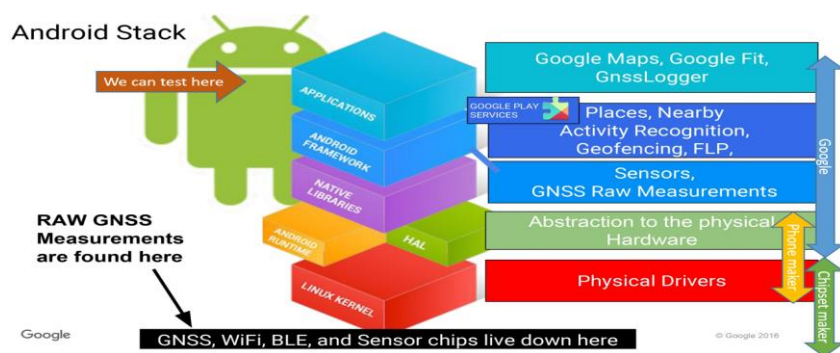


Illustration 59 — Vue d'ensemble du contrôle de la pile (stack) chez les parties prenantes d'Android, adopté après Google (source: Google)

#### Services Google Play sous Android

Le téléphone moderne est un écosystème très complexe qui contient de multiples capteurs, dont des capteurs inertiels, WiFi et Bluetooth, et qui est géré par un système d'exploitation. Cet écosystème fonctionne sous Android via l'encapsulation de l'interface de programmation (API) de localisation des services Google Play. Toutes sortes d'activités de localisation sont possibles, allant du géorepérage et de la détection à l'identification des lieux situés à proximité. L'élément le plus important est l'API «Fused Location Provider» (FLP), qui fournit un service intelligent de localisation et d'économie d'énergie. Il permet de naviguer à l'intérieur des bâtiments en utilisant la puissance du point d'accès WiFi le plus proche et des cartes intérieures pour identifier l'endroit où

l'on se trouve. Il est utilisé en combinaison avec l'apprentissage automatique par le [service de localisation d'urgence \(SLU\) d'Android](#). Ce service, qui s'active lorsque l'utilisateur passe un appel d'urgence, fournit une localisation précise aux services d'urgence, y compris l'élévation et l'étage correct. Il nécessite des accords distincts avec les opérateurs de téléphonie et est activé dans certains pays de l'UE.

### Mesures brutes

Depuis 2016, l'[API de localisation d'Android](#) donne un accès direct à la puce GNSS (en sautant quelques couches de la pile). Ces **observations GNSS** sont **connues sous le nom de «mesures brutes»**. La puce compatible avec l'A-GPS qui est présente dans le téléphone acquiert les observations avant la synchronisation temporelle précise, ce qui génère des observations dans un format plus brut que celui qui est produit dans les récepteurs GNSS conventionnels.

L'accès aux mesures brutes ouvre la porte à des techniques de traitement GNSS plus avancées qui, jusqu'à présent, étaient limitées aux récepteurs GNSS plus professionnels. De nouveaux signaux (fréquences E1/L1 et E5/L5), des observations différentielles et d'autres algorithmes avancés peuvent être utilisés pour sous-tendre des applications telles que la fourniture d'une datation sûre, la surveillance de l'atmosphère ou la détection des interférences.

Bien que le **téléphone portable** soit affecté par **plusieurs limitations**, telles que le fait qu'il ne gère pas correctement la dynamique ni la propagation multivoie, il peut utiliser des **algorithmes plus avancés**, par exemple des solutions différentielles. Une présentation effectuée lors d'une réunion du [groupe de travail de l'EUSPA sur les mesures brutes](#) a montré les résultats post-traitement de données collectées par un utilisateur se déplaçant lentement à pied pour former les lettres du mot «GOOGLE». De gauche à droite, nous voyons l'algorithme simple des mesures brutes, puis un algorithme de filtre de Kalman utilisant des pseudodistances (donnant des résultats semblables à ceux du FLP). La dernière image montre l'amélioration rendue possible par l'utilisation de la phase de la porteuse, ce qui n'est pas possible avec le FLP. Il convient de signaler qu'il est actuellement difficile de dépasser les performances du FLP, sauf dans un environnement ouvert.

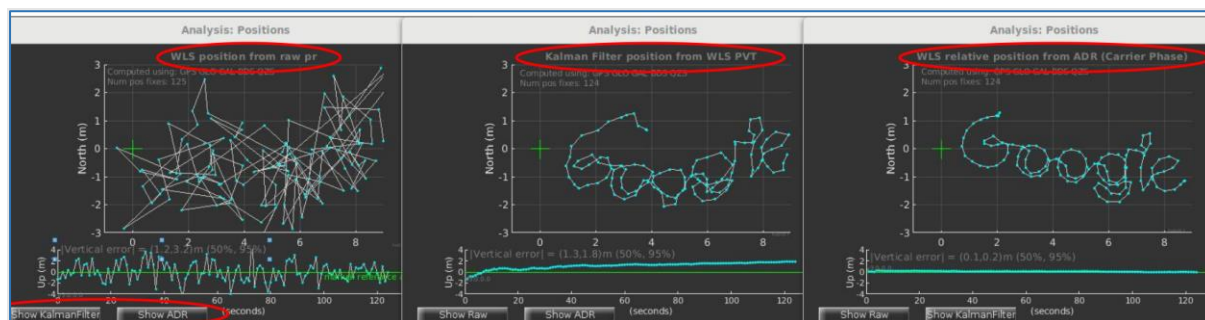


Illustration 60 — Amélioration du positionnement à l'aide des mesures brutes (source: Frank van Diggelen)

De plus amples informations sont disponibles dans le [livre blanc de l'EUSPA concernant l'utilisation des mesures brutes GNSS sur les appareils Android](#).

### 5.3.7.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

[Un nouvel algorithme proposé par Google et destiné à un usage piéton](#) vise à lutter contre le problème de la propagation multivoie. D'abord, il détermine approximativement la localisation de l'utilisateur, idéalement en identifiant le côté de la rue sur lequel se trouve l'utilisateur, sur la base de modèles photo-réalistes des bâtiments. Ensuite, il transmet cette information à la puce afin d'améliorer directement le positionnement par GNSS. Les modèles de données couvrent toutes les villes européennes et la plupart des régions du monde. L'algorithme se concentre sur la série Pixel de Google (en commençant par la version 5G du modèle 5), et son déploiement est prévu sur d'autres téléphones Android.

La couche API communique désormais directement avec la puce GNSS en apportant des corrections et la pile Android est désormais un canal de communication bidirectionnel. En bref, **un téléphone portable peut servir de récepteur GNSS moderne**.

### 5.3.8 Navigation à l'estime sur la base d'une unité de mesure inertielle

La [navigation à l'estime](#) est un procédé qui consiste à calculer la position d'un objet en mouvement sur la base d'une position déterminée, puis à intégrer des estimations de la vitesse, du cap et du temps écoulé. Bien que plusieurs technologies utilisent cette méthode d'estimation, nous nous concentrerons sur les systèmes inertiels, que l'on trouve aussi bien dans le secteur aéronautique que dans celui des transports.

Une [unité de mesure inertielle](#) est un appareil électronique qui mesure et donne la force spécifique d'un objet, sa vitesse angulaire et, parfois, son orientation. Se composant de trois [gyroscopes](#) et de trois [accéléromètres](#) et comportant généralement des [magnétomètres](#), elle sert à déterminer l'orientation sur trois axes d'un objet en mouvement. Pour déterminer la position absolue par rapport au repère de référence, il convient de connaître la position, la vitesse et l'orientation qu'avait l'objet au départ. Si la précision du gyroscope est nettement inférieure à la rotation de la Terre (15 °/h), l'assiette peut être estimée sur la base de la gravité et de la rotation de la Terre.

Le coût du matériel varie en fonction de la qualité des composants, comme le montre le [Tableau 17](#). Un système microélectromécanique (MEMS) à bas coût utilisé dans les appareils mobiles ne peut généralement pas être utilisé seul et nécessite une fusion de capteurs (GNSS, Bluetooth et WiFi, en général), tandis que le gyrolaser (qui mesure la différence de fréquence lumineuse dans les deux sens) est le plus performant et le plus cher.

Tableau 17 — Vue d'ensemble des systèmes de navigation à l'estime

| Type                | <a href="#">Gyrolaser</a> | <a href="#">Gyromètre à fibre optique</a> | <a href="#">Microsystème électromécanique</a> | MEMS à bas coût |
|---------------------|---------------------------|---|---|-----------------|
| Coût [EUR]          | 100 000                   | 20 000                                    | < 2 000                                       | < 1 000         |
| Dérive du gyroscope | 0,003 °/h                 | 1 °/h                                     | 360 °/h                                       | 3 600 °/h       |
| Dérive d'1 m        | ~ 2 min                   | ~ 30 s                                    | ~ 5 s   | < 5 s           |

Il convient de signaler que les valeurs indiquées dans le tableau suivent une dynamique de vitesse constante.

#### 5.3.8.1 Caractéristiques principales

La navigation inertielle consiste à **intégrer les mesures des capteurs** au fil du temps selon un procédé connu sous le nom de «dérive». Les unités haut de gamme peuvent déterminer la rotation de la Terre et fonctionner de manière indépendante, mais elles sont le plus souvent utilisées en combinaison avec des récepteurs GNSS.

Les erreurs augmentant avec le temps, l'approche idéale est une combinaison des mesures des capteurs de l'unité de mesure inertielle avec les relevés de position GNSS dans le cadre d'un filtre de Kalman qui oriente la position de l'objet vers les relevés de position GNSS de bonne qualité, le tout avec une vitesse d'actualisation élevée. On peut citer par exemple le [système de navigation inertielle](#), qui obtient la position, l'orientation et la vitesse d'un objet sans qu'il ne soit nécessaire de recourir à des références externes. Ce système permet de compenser les courtes périodes d'indisponibilité des GNSS, aide à la résolution des ambiguïtés dans le cadre du RTK et contribue à la détection et à l'atténuation des glissements de cycle. Dans le cas d'une solution de couplage étroit, cela signifie également que la position peut être obtenue avec moins de trois satellites visibles.

Des informations techniques sur les unités de mesure inertielle, la mécanisation et la fusion de capteurs sont également disponibles dans le document [Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems](#), P. Groves, Artech House, 2013.

#### 5.3.8.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

La première unité de mesure inertielle utilisable a été produite dans les années 1950 et cette technologie est devenue mature dans les années 1980. Depuis, le développement s'est concentré sur la miniaturisation et sur les systèmes de navigation inertielle, en couplage souple ou étroit, ainsi que sur le filtre de Kalman. **Avec l'installation d'unités de mesure inertielle à bas coût dans les téléphones portables, les unités de mesure inertielle sont désormais très répandues.** Les évolutions actuelles consistent à réduire la taille et les coûts et à améliorer les performances grâce à de nouveaux matériaux. La section consacrée aux technologies quantiques décrit le développement d'une nouvelle approche très prometteuse au niveau du matériel.

### 5.3.9 Navigation magnétique

L'utilisation de la cartographie magnétique pour la navigation remonte à la navigation des missiles dans les années 1960. Ce mode de navigation consistait à **utiliser les changements de terrain pour déterminer le positionnement de l'utilisateur**, au moyen d'une comparaison des relevés en continu avec la carte morphologique enregistrée. Pour être utiles à la navigation, ces observations doivent être stables dans le temps et garantir une différenciation suffisante afin qu'il soit possible de distinguer une zone d'une autre.

#### 5.3.9.1 Caractéristiques principales

La **navigation magnétique** est l'une des plus anciennes formes de navigation. On se servait du noyau magnétique de la Terre pour déterminer le nord et maintenir un azimut constant. L'approche moderne se concentre plutôt sur les anomalies, celles-ci étant stables au fil du temps. La lecture des informations magnétiques consiste à superposer toutes les sources magnétiques, c'est-à-dire le noyau terrestre, la croûte terrestre, les effets anthropiques et les effets météorologiques spatiaux.

Bien que le **noyau terrestre** (de 95 à 99 % de la force magnétique totale) soit bien décrit par les modèles existants et soit mesurable depuis l'espace, ses grandes longueurs d'ondes spatiales et sa variabilité dans le temps le rendent inadapté à la navigation par carte. Le **champ magnétique de la croûte terrestre** (de 1 à 5 % de l'effet magnétique total) est très stable et présente des différences locales. Ce champ magnétique diffère partout dans le monde et s'étend sous les océans, couvrant toute la surface de la Terre. Les **effets anthropiques** peuvent être divisés en effets statiques et effets variables dans le temps. Seule la première catégorie est utile pour la navigation, et de nombreux objets d'origine humaine existant depuis longtemps peuvent être utiles pour déterminer la localisation. Dans ce contexte, les **effets météorologiques spatiaux** introduisent l'équivalent du bruit de mesure.

Les **anomalies magnétiques** (c'est-à-dire les variations locales du champ magnétique terrestre) sont difficiles à mesurer. En outre, les mesures magnétiques doivent être propagées vers le haut pour atteindre des altitudes plus élevées, étant donné que la puissance du champ magnétique suit une loi en carré inverse.

La force magnétique est mesurée par deux types d'**instruments**. Les instruments scalaires, qui mesurent l'intensité du champ, et les instruments vectoriels, comme les magnétomètres des boussoles à vanne de flux, qui mesurent trois composants orthogonaux. Bien que ces derniers instruments soient moins précis, ils peuvent éliminer les erreurs courantes (dus aux effets anthropiques ou spatiaux) et fournir des informations géographiques supplémentaires. Malheureusement, les cartes de gradients sont moins fréquentes que les cartes d'anomalies.

Les cartes n'étant pas exactes, le positionnement est une estimation probabiliste (fonction de probabilité), ce qui nécessite des informations initiales a priori. Avec cette approche, une position statique unique crée de multiples positions possibles. Lorsque l'utilisateur se déplace, l'estimation est mise à jour à l'aide du filtre particulaire pour converger, avec le temps, vers une seule position correcte.

#### 5.3.9.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

Les résultats pratiques de la navigation magnétique montrent que, si la **précision en intérieur est submétrique** et peut même être décimétrique, les **performances à l'extérieur** sont de l'ordre de **plusieurs mètres à plusieurs centaines de mètres**, raison pour laquelle une fusion avec d'autres capteurs s'impose. De même, la démonstration en vol de la navigation magnétique associée à des unités de mesure inertielle a montré son efficacité, la principale limitation étant l'élévation du vol (précision allant de quelques mètres à dix mètres à moins d'un kilomètre d'altitude, mais se dégradant pour être de l'ordre de plusieurs centaines de mètres à une altitude de 10 kilomètres). Il est essentiel de disposer de cartes précises et exactes des anomalies à l'altitude du vol ou en dessous de celle-ci.

Les technologies magnétiques sont **en voie de maturation rapide**. Des entreprises commerciales proposent des services de localisation et de navigation, limités à des zones spécifiques, qui utilisent des données magnétiques en combinaison avec d'autres capteurs (WiFi et Bluetooth et cartographies préalables). D'autres entreprises proposent de tels services pour des applications de transport ferroviaire qui déterminent la voie et la localisation actuelle du train, tandis que d'autres utilisations concernent le secteur maritime: citons le positionnement absolu par radar, qui utilise les éléments caractéristiques extraits des données radar et les apparie à des cartes radar pour déterminer la position de l'utilisateur. Toutes **ces technologies nécessitent une fusion de capteurs**.

### 5.3.10 Orbite terrestre basse (LEO)

Les systèmes en orbite terrestre basse (LEO) sont constitués de centaines, voire de milliers, de satellites émettant depuis une altitude opérationnelle comprise entre 400 et 1 500 kilomètres (en évitant la traînée atmosphérique et les effets solaires). Jusqu'à récemment, cette altitude était principalement utilisée par les satellites d'observation de la Terre (EO) et par les satellites de communication (SatCom), et la taille des constellations ne dépassait pas 100 satellites. Une orbite terrestre basse offre une **faible latence** et une **puissance de signal reçue élevée** (30 dB de plus que pour une orbite terrestre moyenne) à une faible puissance de transmission. Du fait de ces caractéristiques, l'orbite terrestre basse est intéressante pour les mégaconstellations visant à fournir des services d'internet à large bande. Les fournisseurs de haut débit ont l'intention d'utiliser la bande haute fréquence Ku, qui devrait être en mesure d'offrir une vitesse de transmission de données pouvant atteindre de 8 à 20 Gbps.

Un positionnement orbital aussi proche de la surface de la Terre **présente aussi des inconvénients**, l'empreinte habituelle d'un satellite (c'est-à-dire la zone au sol qui peut être couverte par les antennes émettrices) étant beaucoup plus petite (9 satellites en LEO sont nécessaires pour couvrir l'empreinte d'un satellite en MEO). En outre, la vitesse relative du satellite par rapport au sol est beaucoup plus élevée. La période orbitale d'un satellite en LEO est d'environ 100 minutes, contre 12 heures environ pour un satellite en MEO. Autrement dit, des constellations beaucoup plus grandes sont nécessaires pour couvrir totalement la Terre.

Le tableau ci-après présente une sélection non exhaustive de services de satellites en LEO. Compte tenu du coût relativement modeste d'une demande d'autorisation auprès de l'UIT et de l'avantage de priorité (par rapport aux demandes déposées ultérieurement), les opérateurs ont tendance à déposer des demandes pour des systèmes même si leurs plans opérationnels ne sont pas encore totalement au point, de sorte que la liste ci-dessous se fonde sur la proximité perçue des constellations par rapport au marché et des mégaconstellations de communication. Il est important de signaler que les satellites d'observation de la Terre n'ont pas été inclus dans ce tableau.

Tableau 18 — Vue d'ensemble des constellations en LEO

| Système                    | Nombre de satellites | Satellites en service (août 2022) | Altitude [km]  |
|----------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------|
| <a href="#">Iridium</a>    | 66                   | 66                                | 780            |
| <a href="#">Kuiper</a>     | 3 236                | 0                                 | 590 à 630      |
| <a href="#">Starlink</a>   | 4 409                | 2 268                             | 540 à 570      |
| <a href="#">OneWeb</a>     | 4 000                | 354                               | 1 200          |
| <a href="#">Kepler</a>     | 6 en LEO + 24 en MEO | 0                                 | 7 600 + 29 600 |
| <a href="#">Centispace</a> | 120                  | 2                                 | 975            |
| <a href="#">Xona Space</a> | 300                  | 1                                 | 975            |

Il convient de noter que les valeurs indiquées dans le tableau peuvent varier rapidement.

#### 5.3.10.1 Caractéristiques principales

Les constellations en LEO fournissent de multiples services, notamment des communications sécurisées et une connectivité à haut débit pour les appareils intelligents et les véhicules connectés. Elles **n'embarquent pas de charge utile spécifique pour la navigation (sauf dans le cas d'Iridium)** et, par conséquent, elles ne peuvent aujourd'hui que fournir des données de renforcement des signaux GNSS et leurs signaux peuvent être utilisés indirectement pour la navigation dans le cadre de l'approche des signaux d'opportunité (SoO) et de la navigation Doppler.



Actuellement, le seul moyen disponible pour fournir des services de positionnement et de navigation à partir d'une constellation en LEO est la **navigation Doppler**, dont les principales faiblesses sont la détection des orbites et la synchronisation temporelle des relevés (ce qui est partiellement compensé par la méthode de calcul). L'augmentation du nombre de satellites en LEO peut améliorer la précision du positionnement (en utilisant l'approche des signaux d'opportunité Doppler), mais pas la synchronisation.

**Iridium émet un signal de navigation spécifique qui assure également la synchronisation temporelle.** En 2016, le service [Satellite Time and Location \(STL\) de Satelles](#) a été créé par un consortium formé par Iridium, Satelles Inc. et Boeing pour fournir des services de navigation à l'échelle mondiale. L'infrastructure de ce système est principalement constituée d'un segment spatial, le segment terrestre étant limité à une seule station de contrôle (avec une solution de repli d'urgence pouvant être activée en 10 minutes) située aux États-Unis et à plusieurs stations de surveillance au sol passives. Les signaux dans l'espace du service STL sont diffusés sur la fréquence L1 (1 616 à 1 626 MHz).

Iridium a comme concept la visibilité d'un seul satellite par l'utilisateur. Chacun des 66 satellites d'Iridium compte 48 faisceaux ponctuels. Afin de fournir des capacités de sécurité et de protection contre le leurrage, chaque faisceau transmet le message de navigation avec un code individuel, qui change toutes les secondes. Étant donné qu'un contrôle total est exercé sur les faisceaux du service STL, le message de navigation peut être limité à des zones spécifiques (ce qui empêche la réception du signal dans les zones sans abonnés). Les motifs complexes, qui se chevauchent et sont tracés par les faisceaux des satellites, conjugués à des techniques d'authentification des signaux, permettent au service STL de fournir un **temps fiable** (synchronisé avec l'UTC) **et des capacités de localisation sécurisées et indépendantes des GNSS.**

Les signaux du service STL reçus sur la surface de la Terre sont environ 1 000 fois (30 dB) plus forts que ceux des GNSS, ce qui permet une réception **à l'intérieur des bâtiments**. Aucune horloge atomique n'est présente à bord des satellites. Au lieu de cela, les satellites sont étalonnés en permanence par une station au sol et grâce aux capacités intersatellites de la constellation d'Iridium. Les abonnés doivent payer des frais de service.

### *5.3.10.2 Situation actuelle et plans d'optimisation*

Seul le service **STL** a déployé une technologie mature pour le PNT qui peut communiquer un temps fiable, avec une précision de 100 à 150 nanosecondes par rapport à l'UTC(k). Le **positionnement** est plus difficile à obtenir et la solution actuelle consiste à utiliser l'effet Doppler, qui donne une précision à environ 10 mètres près pour les utilisateurs statiques. Une fois qu'un relevé a été obtenu (ce qui nécessite jusqu'à 20 minutes de convergence si la position de départ est inconnue), la position peut être obtenue ne serait-ce qu'avec un seul satellite, mais avec une précision beaucoup moins bonne, de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Le service STL peut également inclure des données d'assistance en temps réel pour les horloges, orbites et charges utiles de transmission de messages des satellites. Les changements rapides de géométrie sont censés améliorer l'atténuation de la propagation multivoie, étant donné que l'effet de cette dernière sera limité à quelques minutes.

Pour surmonter les principales limites de l'utilisation de satellites en LEO pour un PNT complet (par opposition à la fourniture de seuls services de synchronisation), à savoir pour la détermination de l'orbite et pour la synchronisation temporelle, l'utilisation de récepteurs GNSS embarqués est souhaitable pour l'estimation à la fois de la position et de l'heure de la transmission (mais le service n'est alors plus indépendant des GNSS). Cette approche, connue sous le nom de «**Fused LEO PNT**» (PNT obtenu par fusion de satellites en LEO), est au centre de la démarche de **Xona Space**, qui revendique une précision métrique pour son service PNT fondé sur des pulsars. Le premier satellite a été lancé dans le cadre de la mission de lancement partagé de SpaceX en 2022 et le service devrait être opérationnel à la fin de 2023. Les performances effectives ne sont pas encore connues.

**Kepler** est un concept de système PNT entièrement adapté utilisant une combinaison de satellites en LEO et en MEO. Dès lors, ce système est totalement différent des autres systèmes en LEO examinés ci-dessus. En effet, il s'agit d'un système adapté au PNT au lieu d'une optimisation/réutilisation partielle d'une infrastructure en LEO conçue à l'origine dans un but différent, par exemple la communication ou l'accès à l'internet à large bande. Kepler effectue la synchronisation au moyen de mesures directes par des liaisons optiques et peut fonctionner de manière totalement indépendante ou en coopération avec Galileo.

Enfin, une autre option consiste à utiliser la mesure de distance par effet Doppler pour tout signal transmis par des satellites en LEO, **ou** à utiliser ces signaux en tant que signaux d'opportunité. Ces deux approches sont

indépendantes du propriétaire du système, car tout un chacun peut utiliser ces observations. Toutefois, il existe des restrictions étant donné que la méthode Doppler nécessite qu'un grand nombre de satellites soient visibles, tandis que celle des signaux d'opportunité fait intervenir le segment terrestre ad hoc (station de base).

### 5.3.11 Technologies quantiques

Parmi les technologies nouvelles et émergentes qui peuvent apporter des avantages substantiels aux applications PNT, celles qui tirent parti des **effets de la physique quantique sont particulièrement prometteuses**. Toutefois, dans la plupart des cas, plusieurs années de développement sont encore nécessaires pour que les nouvelles technologies quantiques aient réellement l'effet escompté sur les applications PNT.

#### 5.3.11.1 Horloges quantiques

##### 5.3.11.1.1 Caractéristiques principales

Les progrès constants dans le domaine des horloges atomiques devraient grandement bénéficier aux systèmes de positionnement par satellite:

- en ce qui concerne l'**infrastructure au sol**, les horloges fondées sur l'interférométrie à atomes froids peuvent être prises en considération pour remplacer les ensembles existants d'horloges au césium et de masers à hydrogène actifs qui sont utilisés de manière universelle pour générer le temps du système. Bien que les horloges à atomes froids aient atteint un stade de développement assez mature et que certains produits commerciaux commencent à devenir disponibles, leur utilisation reste largement limitée à la communauté scientifique;
- en ce qui concerne l'**infrastructure spatiale**, de meilleures horloges dans les satellites amélioreront l'erreur de géolocalisation de l'utilisateur dans les signaux dans l'espace, mais les contraintes liées à leur utilisation dans l'espace limitent actuellement les technologies candidates possibles aux horloges à ions, aux horloges pulsées à pompage optique et, à plus long terme, aux horloges atomiques optiques utilisant des effets non linéaires tels que l'absorption à deux photons et la spectroscopie de transfert de modulation.

Des horloges atomiques optiques de laboratoire sont déjà utilisées et contribueront sans aucun doute à la mise en œuvre d'une échelle de temps métrologique: bien que les GNSS n'aient pas besoin de réaliser de manière autonome une telle échelle de temps, ils en tireront probablement parti au moyen de protocoles de transfert du temps fondés sur le transfert bidirectionnel du temps et de fréquences des satellites sur la phase de la porteuse, de liaisons optiques en espace libre cohérentes ou de fibres optiques.



Illustration 61 — Une horloge à atomes froids commerciale (à gauche) et un prototype d'étalon de fréquence optique basé sur une transition à deux photons au rubidium (à droite). À noter que ce dernier n'inclut pas le peigne de fréquences nécessaire pour traduire la fréquence optique stabilisée en signal micro-ondes [Strangfeld 2021]

#### 5.3.11.1.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

À plus long terme, **de nouvelles architectures GNSS pourraient émerger pour la génération et la distribution du temps à l'échelle optique** afin de tirer pleinement parti des propriétés de stabilité des horloges atomiques optiques interconnectées par des liaisons optiques intersatellites et sol-satellite.

Par exemple, **un futur système pourrait dépendre entièrement d'une infrastructure spatiale**, sans qu'il ne soit nécessaire de répartir partout dans le monde des capteurs ou des stations de liaison montante, alors que ceux-ci sont nécessaires pour les GNSS actuels. Cette infrastructure spatiale pourrait inclure des satellites en MEO et en LEO, équipés respectivement de lasers stabilisés sur cavité et d'horloges atomiques optiques, correctement interconnectés avec des liaisons optiques pour assurer au niveau mondial une synchronisation à la picoseconde et des mesures de la distance d'une précision micrométrique. En principe, la seule infrastructure au sol nécessaire serait une station optique de réception pour maintenir le temps du système aligné sur le temps universel coordonné UTC. Le projet [Kepler](#) montre comment les horloges atomiques optiques peuvent contribuer à de futures architectures GNSS grâce à leur **amélioration par 100 des signaux dans l'espace**.

Toutefois, il convient de tenir compte du fait qu'en raison des perturbations de l'ionosphère et de la troposphère et des interférences de la propagation multivoie, un meilleur signal dans l'espace ne se traduit pas immédiatement par une meilleure précision de positionnement pour l'utilisateur final. Des techniques complémentaires telles que le positionnement ponctuel précis ou le positionnement cinématique en temps réel doivent être considérablement améliorées pour que la génération et la distribution du temps à l'échelle optique dans les GNSS bénéficient effectivement à l'utilisateur final. En outre, un processus de miniaturisation très complexe sera nécessaire pour que les horloges atomiques optiques atteignent la taille d'une puce et répondent aux exigences d'alimentation par batterie si elles doivent être utilisées dans des équipements portatifs haut de gamme.

#### 5.3.11.2 Systèmes de navigation inertielle quantiques

##### 5.3.11.2.1 Caractéristiques principales

Les principes de la physique quantique sont également exploités pour la navigation, sachant que **l'exploitation de propriétés atomiques fondamentalement inaltérables améliorera les performances de dérive des unités de mesure inertielle**. La recherche s'est concentrée sur:

- les gyroscopes à [résonance magnétique nucléaire \(RMN\)](#) utilisant le spin nucléaire, qui ont été développés pour la première fois dans les années 1960, mais dont l'attrait commercial a été affaibli par la concurrence des gyrolasers et des gyromètres à fibre optique. Ce n'est que récemment que de nouveaux appareils exploitant les technologies de miniaturisation pour des systèmes de navigation compacts à un coût compétitif sont apparus;
- les gyroscopes [sans relaxation à échange de spin \(SERF\)](#), beaucoup moins étudiés, qui utilisent le spin électronique de métaux alcalins (proposés pour la première fois en 2005) ou qui tirent parti du spin des vacances d'azote dans les diamants (au cours de la dernière décennie), ces deux techniques étant encore principalement limitées à des recherches universitaires;
- les gyroscopes fonctionnant par [interférences avec des atomes froids \(CAI\)](#), aujourd'hui les systèmes les plus prometteurs pour la navigation autonome, qui exploitent la stabilité fondamentale de la masse atomique pour garantir l'immunité face aux dérives, éliminant ainsi la nécessité d'étalonnages périodiques. En outre, les systèmes CAI mesurent des valeurs absolues pour le taux d'accélération et de rotation, et non des variations par rapport à des valeurs de référence. Ces avantages ont pour contrepartie un coût, une taille, un poids et une empreinte de puissance élevés, étant donné que des technologies habilitantes complexes sont nécessaires (systèmes à vide, lasers et systèmes optiques, unités électroniques de contrôle, etc.) et que leur progrès est un facteur clé pour le développement de capteurs inertiels CAI déployables sur le terrain.

Le [Tableau 19](#) compare ces gyroscopes quantiques aux gyroscopes conventionnels MEMS et ESG. Les gyroscopes qui utilisent des [systèmes microélectromécaniques \(MEMS\)](#) sont largement répandus dans les applications grand public, mais il est peu probable qu'ils satisfassent aux exigences de la navigation autonome

en matière de dérive. Les performances des gyroscopes flottants mécaniques et des gyroscopes optiques approchent de la limite déterminée par les principes physiques sous-jacents, et toute amélioration ira de pair avec un surcoût élevé. Les [gyroscopes à suspension électrique \(ESG\)](#) sont également pris en considération. Il s'agit de gyroscopes à deux degrés de liberté dans lesquels une bille mise en rotation est suspendue dans le vide par un champ électrique. Les gyroscopes atomiques (RMN, SERF et CAI) devraient rivaliser avec les gyroscopes de navigation conventionnels pour la prochaine génération des systèmes de navigation inertielle.

Tableau 19 — Comparaison des gyroscopes sur la base de différents principes physiques [données extraites de Zhang 2016]

| Utilisation        | Type               | Dérive (°/h)                        | Taille (mm <sup>3</sup> )         | Coût (USD)                        |
|--------------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Tactique</b>    | MEMS               | 1 000 à 0,1                         | < 100                             | < 100                             |
| <b>Navigation</b>  | RMN                | 10 <sup>-2</sup>                    | 10 à 10 <sup>4</sup>              | 10 <sup>3</sup> à 10 <sup>4</sup> |
|                    | Gyrolaser          | 10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-3</sup> | ~ 10 <sup>5</sup>                 | 10 <sup>4</sup> à 10 <sup>5</sup> |
|                    | À fibre optique    | 10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>5</sup> à 10 <sup>6</sup> | 10 <sup>4</sup> à 10 <sup>5</sup> |
| <b>Stratégique</b> | Flottant mécanique | 10 <sup>-3</sup> à 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>6</sup> à 10 <sup>7</sup> | 10 <sup>5</sup> à 10 <sup>6</sup> |
|                    | ESG                | 10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-5</sup> | 10 <sup>7</sup> à 10 <sup>8</sup> | 10 <sup>6</sup> à 10 <sup>7</sup> |
|                    | SERF               | ~ 10 <sup>-4</sup>                  | 10 <sup>6</sup> à 10 <sup>7</sup> | < 10 <sup>5</sup>                 |
|                    | CAI                | > 10 <sup>-5</sup>                  | ~ 10 <sup>9</sup>                 | 10 <sup>5</sup> à 10 <sup>6</sup> |



Illustration 62 — Un prototype de gyroscope à RMN pour applications tactiques de Northrop Grumman (à gauche) et une unité de mesure inertielle de laboratoire développée par IXblue par hybridation de gyromètres à fibre optique et d'accéléromètres CAI (à droite)

#### 5.3.11.2.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

Pour **mettre au point une unité de mesure inertielle à six axes CAI qui soit portable**, rapide, robuste et suffisamment compacte pour être utilisée **pour la navigation inertielle**, il sera nécessaire de trouver plusieurs compromis et de relever plusieurs défis technologiques. Cela devrait prendre **plusieurs années d'efforts soutenus**. Afin de tirer pleinement parti de l'absence de dérive inhérente au principe de fonctionnement de

cette technologie, il convient de développer et de mettre en œuvre des technologies fiables et solides à même de permettre une exploitation autonome à long terme dans des environnements difficiles.

En outre, il y a lieu de signaler qu'une unité de mesure inertielle CAI présente inévitablement des temps morts durant le refroidissement des atomes et qu'elle doit donc fonctionner de manière hybride et inclure aussi des dispositifs classiques. Une autre approche pourrait consister à brancher des systèmes CAI sur des accéléromètres et gyroscopes rapides et sensibles utilisant d'autres principes de fonctionnement pour leur fournir un étalonnage.

Des gravimètres à atomes froids à axe unique, utilisés pour mesurer les lentes variations du champ gravitationnel le long d'un axe unique, sont déjà disponibles sur le marché (TRL = 9, c'est-à-dire système réel prouvé dans un environnement opérationnel), tandis que plusieurs prototypes d'accéléromètres et de gyroscopes CAI ont été mis au point, et leur TRL est compris entre 3 (preuve expérimentale de concept) et 4 (technologie validée en laboratoire).

Enfin, il convient de rappeler que les capteurs atomiques destinés à la navigation inertielle sont susceptibles d'être considérés comme des biens à double usage et soumis à des restrictions d'exportation au titre de la réglementation ITAR des États-Unis sur le trafic d'armes au niveau international, comme c'est déjà le cas pour les systèmes optiques ou mécaniques à haute performance.

### 5.3.11.3 Références

Nous conseillons au lecteur intéressé par une analyse plus approfondie de consulter les ouvrages suivants:

- G. Giorgi et al., *Advanced technologies for satellite navigation and geodesy*, Advances in Space Research 64, 2019.
- W.R. Milner et al., *Demonstration of a Timescale Based on a Stable Optical Carrier*, PRL 123, 173201, 2019.
- B. Jaduszliwer et J. Camparo, *Past, present and future of atomic clocks for GNSS*, GPS Solutions 25:27, 2021.
- T. Schuldt et al., *Optical clock technologies for global navigation satellite systems*, GPS Solutions Vol. 25, No. 83, 2021.
- Strangfeld et al., *Prototype of a compact rubidium-based optical frequency reference for operation on nanosatellites*, Journal of the Optical Society of America B Vol. 38, Issue 6, 2021.
- M. Schioppo et al., *Comparing ultrastable lasers at  $7 \times 10^{-17}$  fractional frequency instability through a 2220 km optical fibre network* Nature Communications, 13:212, 2022.
- Zhang et al., *Inertial rotation measurement with atomic spins: From angular momentum conservation to quantum phase theory*, Appl. Phys. Rev. 3, 041305, 2016.
- M. Travagnin, *Cold atom interferometry for inertial navigation sensors - Technology assessment: space and defence applications*, JRC122785, EUR 30492 EN, 2020.
- M.J. Wright et al., *Cold Atom Inertial Sensors for Navigation Applications*, Frontiers in Physics, soumission du 14 juillet 2022.



### 5.3.12 PNT fondé sur des pulsars

Un **pulsar** (contraction de «**pulsating radio source**» — source pulsante d’ondes radio) est une **étoile à neutrons** très magnétique et tournant très rapidement qui émet des faisceaux de rayonnement électromagnétique depuis ses pôles magnétiques. Le rayonnement électromagnétique ne peut être observé que lorsqu’un cône d’émission est orienté vers la Terre. Les étoiles à neutrons étant des objets très compacts avec des périodes de rotation courtes et régulières, **l’intervalle entre les impulsions est très précis** et se mesure en millisecondes ou en secondes pour un pulsar donné. Le signal électromagnétique (en particulier dans les bandes radio, optiques et X) émis par les pulsars peut être détecté par un équipement spécialisé et chaque pulsar peut être identifié sur la base d’une reconstruction de la courbe lumineuse à partir du signal émis. Par conséquent, en plus d’être une source de synchronisation précise, un pulsar peut aussi être utilisé pour la navigation à une échelle galactique. Cette idée a été proposée pour la première fois en 1974 par G.S. Downs.

#### 5.3.12.1 Caractéristiques principales

L’utilisation des pulsars a d’abord été envisagée pour la **synchronisation** (un pulsar milliseconde offre une stabilité temporelle comparable à celle des horloges atomiques). Cette idée a déjà été concrétisée dans la pratique, la première horloge terrestre à pulsar ayant été installée à Gdansk, en Pologne, en 2011, pour commémorer le 400<sup>e</sup> anniversaire de la naissance de [Johannes Hevelius](#). Depuis lors, plusieurs autres appareils ont été installés pour expérimenter concrètement le concept d’échelle de temps fondée sur des pulsars, conçu comme une combinaison d’observations à long terme des pulsars et d’horloges locales hautement stables. En effet, même la [simple combinaison d’une horloge atomique et de corrections calculées à partir de l’observation des pulsars génère une échelle de temps très stable](#), sans nécessiter d’autres données.

Bien que les pulsars ne puissent pas tous être utilisés à des fins de synchronisation précise, principalement en raison de leur fréquence, ils sont tous très stables (certains sont observés depuis les années 1970). Il est intéressant de signaler que les sources moins brillantes sont plus stables. Chaque pulsar possède un profil de transmission unique, en particulier du point de vue de la période de répétition des impulsions, ce qui permet de l’identifier. C’est pourquoi l’utilisation des pulsars à des fins de navigation a été envisagée, la première fois par G.S. Downs.

Les principaux arguments étaient la visibilité des pulsars depuis n’importe quel endroit de la galaxie et le fait que plusieurs pulsars (qui peuvent être distingués en fonction de leur fréquence, à l’instar des phares) peuvent former un ensemble de balises dont l’orientation est connue.

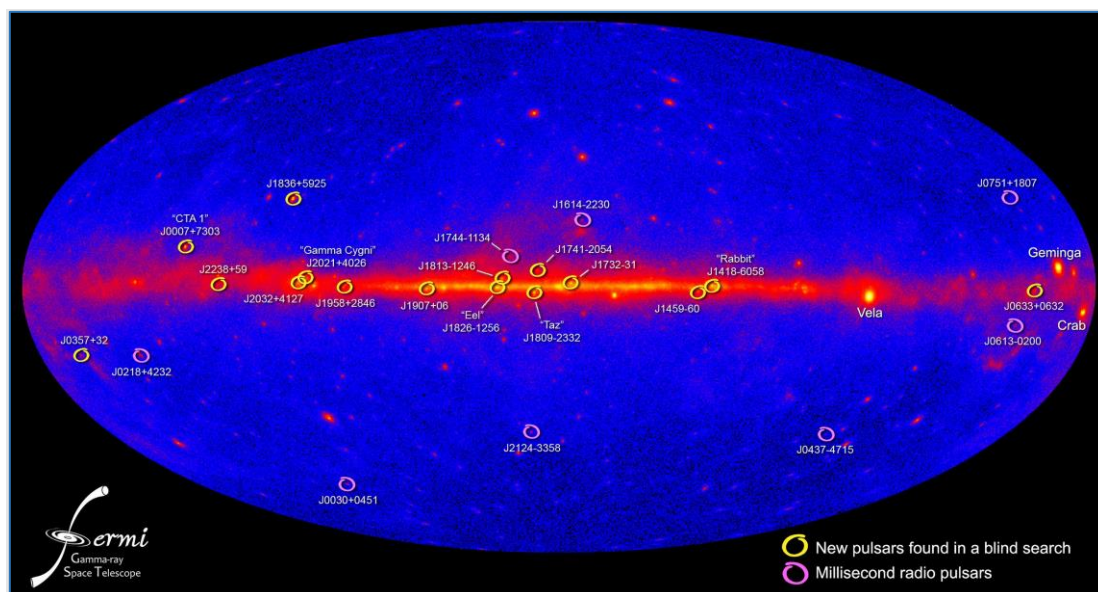


Illustration 63 — Les pulsars connus et leur position sur les longitude et latitude galactiques (source: domaine public de la NASA)



Depuis lors, de multiples missions spatiales ont observé et recensé des milliers de sources de rayons X, et plusieurs d'entre elles sont activement suivies. En outre, d'autres signaux radio spatiaux ont été identifiés, tels que les sursauts de rayons gamma (GRB), qui sont recommandés pour le positionnement et la vitesse, tandis que les sources de rayons X lumineux et les sursauts radio rapides (FRB) sont recommandés pour la navigation relative. Les pulsars radio sont également utilisés activement pour des études des ondes gravitationnelles.

### 5.3.12.2 Situation actuelle et plans d'optimisation

La plupart des résultats de recherche pertinents proviennent de la NASA et de l'ESA, qui développent des capacités et des algorithmes. Deux **méthodes de navigation** pour les véhicules spatiaux sont proposées:

- la navigation absolue, dans le cadre de laquelle un seul satellite tente de se positionner par rapport à un point de référence inertiel, tel que le barycentre du système solaire. Cette méthode nécessiterait une connexion sporadique entre le satellite et le contrôle au sol pour la mise à jour des éphémérides des pulsars susceptibles de changer occasionnellement en raison de glitches des pulsars (périodes qui se mesurent en années) ou d'autres irrégularités temporelles;
- la navigation relative, dans le cadre de laquelle plusieurs véhicules spatiaux observent les mêmes sources et seules les observations relatives au véhicule spatial concerné sont utilisées. Des observations différentielles entre deux véhicules spatiaux volant en formation, à une distance connue, ont également été proposées.

Le **principal intérêt de la navigation fondée sur des pulsars concerne les systèmes dans l'espace lointain** et les vols interplanétaires. La plupart des systèmes de navigation spatiale existants fonctionnent à l'aide de la télémétrie, et la navigation-synchronisation fondée sur des pulsars X (XNAV) pourrait considérablement réduire les coûts et offrir une certaine souplesse en raison de l'augmentation de la précision. Les aspects les plus attrayants sont la grande disponibilité des signaux et l'absence d'entretien (la navigation ne nécessite que des mises à jour occasionnelles des éphémérides des pulsars identifiés). Les capteurs à rayons X sont très résistants au bruit des autres fréquences, ce qui est très utile pour les applications dans l'espace. Seuls les pulsars transmettant dans ces fréquences sont envisagés pour la navigation, même si d'autres plages de fréquences sont à l'étude.

Une étude de l'ESA de 2004 a montré que l'estimation de la distance par l'observation d'un seul pulsar nécessite une taille d'antenne modérée (10 m<sup>2</sup>) et un temps d'intégration du signal d'environ une heure. Elle a également conclu que la navigation-synchronisation fondée sur des pulsars X (XNAV) pourrait garantir une précision de 1 000 kilomètres pour les missions spatiales. Étant donné que le système complet nécessiterait plusieurs antennes pour des observations synchrones fondées sur plusieurs pulsars, le poids total de ce système a été jugé trop lourd pour le véhicule spatial.

Depuis, plusieurs essais et démonstrations de matériel ont été menés à bien. En 2016, la Chine a lancé une mission de démonstration expérimentale de la navigation fondée sur des pulsars X (XPNAV-1), qui a démontré une résolution et une mesure du temps en microsecondes sur la base d'un seul pulsar. Le matériel doit encore être miniaturisé et les calculs de traitement des signaux sont encore intensifs sur le plan informatique. Une étude récente de l'ESA, menée avec l'université de Padoue, a calculé des augmentations de la précision en dessous du kilomètre, tout en réduisant le SWAP (taille, poids et puissance) de la charge utile: environ 10 kg de masse sur 30 x 30 x 30 cm de volume et 10 W de consommation d'énergie.

D'autres études de l'ESA dans le domaine de la navigation interplanétaire sont en cours, l'objectif étant de réduire à une unité le nombre d'antennes au détriment des opérations plus complexes des véhicules spatiaux pour l'acquisition séquentielle des signaux des pulsars. Les chercheurs prévoient également que les mesures fondées sur des pulsars dans la plage RF pourraient servir à la navigation terrestre à l'avenir, en particulier dans certains cas d'utilisation dans lesquels la taille de l'antenne ne serait pas un problème. De plus amples informations sont disponibles dans l'article suivant: [Use of pulsars for ship navigation: an alternative to the sextant.](#)

## 5.4 Résumé des forces, des faiblesses, des opportunités et des menaces (SWOT)

|                         |   | FORCES   | FAIBLESSES  | OPPORTUNITÉS  | MENACES  |
|-------------------------|---|--|---|---|--|
| TECHNOLOGIES ÉMERGENTES | White Rabbit                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Technologie testée et éprouvée, facile à mettre en œuvre et à gérer.</li> <li>- Fournie à la fois par de petites et de grandes entreprises européennes.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessite une infrastructure de base et une fibre optique ininterrompue de bout en bout.</li> <li>- Une mise à niveau de l'infrastructure est peut-être nécessaire.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Innovation de la technologie existante.</li> <li>- L'UE est le principal fournisseur.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'utilisation commerciale du réseau scientifique en place n'est pas encore convenue.</li> </ul>   |
|                         | Distribution du temps par réseau informatique | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le réseau n'a pas besoin d'être homogène et, le plus souvent, les infrastructures existantes peuvent être utilisées.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le budget d'erreur des liaisons sous-jacentes nécessitera un internet commercial (largeur de bande garantie) et non un service «au mieux».</li> <li>- Les liaisons micro-ondes peuvent être brouillées.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le nombre de connexions augmente naturellement avec les marchés émergents tels que l'IdO et les villes ou les transports intelligents.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le réseau ne doit pas être extrapolé, mais interpolé (conçu pour soutenir l'expansion).</li> <li>- Le budget d'erreur du réseau doit peut-être être excessivement prudent.</li> </ul>   |
|                         | Pseudolites                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Signaux ad hoc cryptés conçus pour un positionnement haute précision à l'intérieur et à l'extérieur au moyen de faibles niveaux de puissance.</li> <li>- Certaines technologies sont résistantes à la propagation multivoie grâce à des antennes V-Ray de formation de faisceau spécifiques.</li> <li>- Le système de radiodiffusion n'a aucune limite de capacité.</li> <li>- Résilience aux défaillances locales et systémiques; certaines technologies sont certifiées pour des applications de sauvegarde de la vie.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La précision dépend de la géométrie, de l'emplacement des émetteurs-récepteurs, de sorte que l'estimation de la hauteur est moins fiable.</li> <li>- Le nombre d'unités ne s'adapte pas bien à la surface couverte et le réseau doit être déployé à proximité de la zone de service souhaitée.</li> <li>- Le temps UTC nécessite une synchronisation externe.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le déploiement est facile et le coût d'entretien est faible.</li> <li>- Usage commercial établi.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La fréquence utilisée peut être exploitée par tout un chacun sans restriction (WiFi) ou être soumise à des autorisations spécifiques.</li> <li>- Les composantes terrestres peuvent être attaquées physiquement et doivent être alimentées en énergie.</li> </ul> |
|                         | Réseaux 5G et cellulaires                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisent les infrastructures existantes et fournissent un PNT complet.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Actuellement, toutes les informations de positionnement sont basées sur la fusion de capteurs avec les GNSS.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Marché de masse.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'aspect PNT n'est pas bien développé dans la plateforme proposée.</li> </ul>   |
|                         | R-Mode  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilise les infrastructures radio existantes.</li> <li>- Permet de contrôler le positionnement, la synchronisation et l'intégrité.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La couverture est limitée aux eaux côtières et la géométrie imposée par les côtes peut causer des difficultés.</li> <li>- Applications haute précision non prises en charge.</li> <li>- Ce système et ses services sont en développement et la synchronisation indépendante des GNSS est difficile.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Peut combler les lacunes terrestres du système PNT maritime.</li> <li>- Utilise des services radio maritimes communs aux côtes du monde entier; peut être adapté à l'échelle mondiale le long des grandes routes maritimes.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dépend de la disponibilité des infrastructures radio existantes.</li> <li>- La normalisation doit être achevée dans les 5 à 10 prochaines années.</li> </ul>  |

Illustration 64 — Résumé des forces, des faiblesses, des opportunités et des menaces pour les technologies émergentes

|                                 |  | FORCES   | FAIBLESSES   | OPPORTUNITÉS   | MENACES   |
|---------------------------------|--|--|--|--|---|
| TECHNOLOGIES ÉMERGENTES (suite) | Navigation par images                                | - Technologie testée.  | - L'étalonnage du matériel spécifique est nécessaire.  | - Technologie très prometteuse dans le cadre de la fusion de capteurs.   | - Les solutions actuelles sont spécifiques au marché.   |
|                                 | Navigation mobile                                    | - Service omniprésent déjà disponible dans les appareils mobiles.  | - Les performances ne sont pas homogènes et dépendent de l'appareil mobile.<br>- La technologie est développée par des entreprises autres que les fabricants d'appareils mobiles.    | - Technologie pour le marché de masse qui a été testée dans diverses conditions commerciales.  | - Développée par des entreprises commerciales (Google, Apple) en tant que service à valeur ajoutée.   |
|                                 | Navigation à l'estime et unités de mesure inertielle | - Navigation passive dans le monde entier, à toute attitude et dans toutes les conditions météorologiques.<br>- Technologie fiable, facile à utiliser et avec une capacité de réaction rapide. | - Augmentation exponentielle du bruit et des erreurs mécaniques.<br>- Les solutions moins coûteuses dépendent de la disponibilité et de la qualité des informations complémentaires. | - Un matériel à bas coût peut suffire pour certaines applications.<br>- Immunité face au leurrage.<br>- Le coût dépend de la performance de l'unité.   | - Coût des unités haut de gamme.<br>- Les GNSS sont requis pour la fusion de capteurs pour le positionnement à l'échelle mondiale.  |
|                                 | Cartes environnementales                             | - Ne nécessitent pas d'infrastructures.  | - Qualité des cartes sous-jacentes.<br>- Certaines technologies nécessitent que le ciel soit visible.  | - Leurrage difficile.<br>- Matériel prêt à l'emploi.   | - La qualité des cartes sous-jacentes n'est pas homogène.<br>- La SLAM (localisation et cartographie simultanées) n'est pas efficace pour mettre à jour les données/les utilisateurs ne veulent pas partager leurs données.               |
|                                 | Orbite terrestre basse (LEO)                         | - Ne nécessitent pas d'infrastructures.<br>- Signal plus fort (de 30 dB) qu'en MEO; retard de synchronisation comparable à celui des infrastructures terrestres.                               | - Nombre élevé de satellites nécessaires et effet Doppler important de la constellation.<br>- Sauf dans le cas de la société Iridium, aucun signal PNT spécifique n'est utilisé.     | - Déploiement rapide des mises à jour compte tenu de la durée de vie limitée des nouveaux satellites en LEO.<br>- Avec autant de signaux, d'autres approches de signaux d'opportunité (SoO) pourraient être développées. | - Le déploiement du service PNT en plus du service de communication pourrait être trop cher.<br>- Le nombre proposé de satellites pourrait poser problème à l'avenir.<br>- Les estimations des orbites ne sont pas suffisamment précises. |
|                                 | Technologies quantiques                              | - Reposent sur des propriétés physiques fondamentales inaltérables.  | - Des technologies habilitantes complexes sont nécessaires.  | - Amélioration d'un large éventail de performances.  | - Coût élevé, acceptation par l'utilisateur final.  |
|                                 | PNT fondé sur des pulsars                            | - Utilisation possible partout dans l'espace, moyennant seulement des mises à jour périodiques des almanachs.  | - Nécessite une horloge de resynchronisation précise et des antennes alignées avec précision pour chaque pulsar (chaque direction) suivi.  | - PNT complet pour les missions spatiales.<br>- Synchronisation des opérations sur la Terre.   | - Le coût et la taille du matériel.<br>- Des essais de démonstration n'ont pas été effectués.   |

Illustration 65 — (suite) Résumé des forces, des faiblesses, des opportunités et des menaces pour les technologies émergentes

## 6 APPENDICE B: Services PNT résilients

Ainsi qu'il ressort de la section 4, les services de positionnement, de navigation et de synchronisation (PNT) sont essentiels pour la société et l'économie de l'UE, car ils permettent de disposer d'informations de positionnement et de synchronisation précises pour les infrastructures critiques, le marché professionnel et le marché de masse, ainsi que pour les applications de sauvegarde de la vie et les applications critiques sur le plan de la responsabilité.

Les perturbations et les défaillances des services PNT peuvent avoir de graves conséquences, telles que des pertes financières et des risques pour la sécurité, ce qui montre bien l'importance de la résilience de ces services. Des informations de synchronisation inexactes peuvent provoquer des perturbations dans les réseaux électriques, les marchés financiers et les réseaux de communication; de même, des informations de positionnement incorrectes peuvent entraîner des accidents dans les systèmes de transport et de logistique.

Étant donné que le niveau de protection devrait varier en fonction du degré critique de l'application, un **service PNT résilient** nécessite la détection des menaces, des mécanismes de réaction appropriés et un prompt rétablissement des services. Il faut pour cela développer de nouveaux matériels (antennes, par exemple), de nouveaux logiciels (nouveaux algorithmes) et des systèmes de substitution.

La vision de l'UE plaide en faveur d'un système de systèmes PNT afin de parvenir à des services PNT résilients sur la base de plusieurs éléments:

- **redondance**: les services PNT devraient disposer de systèmes redondants et de mécanismes de repli garantissant la continuité en cas de défaillance ou de perturbation;
- **diversité**: les services PNT devraient utiliser de multiples sources de données et de signaux pour être plus fiables;
- **surveillance, essais et entretien**: la surveillance, les essais et l'entretien réguliers des systèmes PNT sont essentiels pour détecter, déterminer et résoudre les problèmes potentiels avant qu'ils n'entraînent une défaillance;
- **sécurité/cybersécurité**: les systèmes PNT devraient être assortis de mesures de sécurité/cybersécurité solides protégeant des attaques délibérées et garantissant l'intégrité des informations;
- **repère de référence commun pour le positionnement et la synchronisation**: un tel repère commun est nécessaire pour éviter l'accumulation d'erreurs lors de la combinaison des services PNT, les différents services PNT fournissant des informations de positionnement et de synchronisation selon des repères et des systèmes de référence en la matière potentiellement différents;
- **normes et réglementations**: la normalisation et la réglementation en matière de PNT peuvent contribuer à ce que les services PNT soient conçus, déployés et exploités de manière à répondre à des exigences spécifiques en matière de performance et de fiabilité. Citons par exemple:
  - des normes/lignes directrices **pour l'évaluation des performances des services PNT**, y compris les cas d'essai et les procédures d'essai,
  - des normes/lignes directrices prévoyant des **exigences minimales de performance** dans les domaines d'application (par exemple, secteur aéronautique, secteur maritime, applications de synchronisation, etc.),
  - des normes/lignes directrices (essais et performances minimales) relatives à des **techniques de détection et d'atténuation des interférences et des leurrages**;
- **éducation et sensibilisation** des utilisateurs et des concepteurs à l'importance des services PNT ainsi qu'à leurs risques et menaces potentiels.

L'intégration de tous les éléments décrits ci-dessus aura pour conséquence que les services PNT deviendront plus résilients, que leurs utilisateurs atténueront les risques de perturbations et de défaillances et que la continuité des activités sera assurée.

## 7 APPENDICE C: Réglementations et normes

Le tableau ci-dessous résume la liste des activités recensées dans la section 3.4 pour faciliter l'adoption des GNSS européens dans les différents segments de marché.

Tableau 20 — Résumé des activités destinées à faire adopter les GNSS européens (essentiellement réglementations et normes)

| Segment de marché             | Système       | Type  | Organisation | Objet   | Calendrier       | Remarques   |
|-------------------------------|---------------|-------|--------------|---|------------------|---|
| Tous les segments             | GNSS          | Norme |              | Techniques de détection et d'atténuation des interférences et des leurrages   | Dès que possible | Augmentation de la menace que représentent les interférences et les leurrages   |
| Aviation avec équipage à bord | EGNOS         | Norme | EUROCAE      | Normes minimales de performance opérationnelle pour les équipements embarqués des systèmes de renforcement satellitaire | 2023             | ED-259A, y compris les procédures d'essai   |
| Aviation avec équipage à bord | EGNOS         | Norme | EUROCAE      | Normes minimales de performance opérationnelle pour les équipements embarqués des systèmes de renforcement satellitaire | 2024             | ED-259B, y compris le H-ARAIM et les scénarios institutionnels  |
| Aviation avec équipage à bord | Galileo/EGNOS | Norme | OACI         | Normes et pratiques recommandées (SARP) de l'OACI, annexe 10 de la convention de Chicago, volume I, amendement 93       | 2023             | Amendement à l'annexe 10 de l'OACI y incluant des SARP concernant les SBAS bifréquences et multiconstellations et Galileo |
| Aviation avec équipage à bord | Galileo/EGNOS | Norme | OACI         | Normes et pratiques recommandées (SARP) de l'OACI, annexe 10 de la convention de Chicago, volume I, version actualisée  | 2024             | Amendement à l'annexe 10 de l'OACI y incluant l'ARAIM   |

| Segment de marché             | Système                     | Type               | Organisation | Objet   | Calendrier | Remarques   |
|-------------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------|---|------------|---|
| Aviation avec équipage à bord | Galileo/EGN OS              | Norme              | OACI         | Normes et pratiques recommandées (SARP) de l'OACI, annexe 10 de la convention de Chicago, volume I, version actualisée  | 2026       | Amendement à l'annexe 10 de l'OACI y incluant l'authentification  |
| Aviation avec équipage à bord | Galileo                     | Norme              | OACI         | Normes et pratiques recommandées (SARP) de l'OACI, annexe 10 de la convention de Chicago, volume I, version révisée   | 2029       | Amendement à l'annexe 10 de l'OACI y incluant les GBAS bifréquences et multiconstellations avec des capacités multiconstellations et éventuellement multifréquences |
| Aviation avec équipage à bord | DME (pour un PNT résilient) | Norme              | EUROCAE      | Spécification minimale de performance des systèmes d'aéronefs pour la qualité de navigation requise pour la navigation de surface                                 | Juin 2022  | ED-75E  |
| Aviation avec équipage à bord | DME (pour un PNT résilient) | Norme              | EUROCAE      | Normes minimales de performance opérationnelle pour les dispositifs de mesure de distance (DME/N et DME/P) (équipement au sol)                                    | 2023       | ED-57A  |
| Aviation avec équipage à bord | DME (pour un PNT résilient) | Norme              | EUROCAE      | Spécification minimale de performance des systèmes d'aéronefs (MASPS) pour les infrastructures de DME soutenant le positionnement PBN                             | 2023       | Nouveau document  |
| Aviation sans                 | Galileo/EGN OS              | Lignes directrices | EUROCAE      | Lignes directrices ED-301 relatives à l'utilisation de solutions multi-GNSS pour la catégorie «spécifique» des UAS — Opérations à risque faible SAIL I et SAIL II | Août 2022  | Couvre l'utilisation des GNSS pour les exploitations de drones à risque faible  |



| Segment de marché             | Système       | Type               | Organisation | Objet  | Calendrier | Remarques  |
|-------------------------------|---------------|--------------------|--------------|--|------------|--|
| équipage à bord               |               |                    |              |  |            |  |
| Aviation sans équipage à bord | Galileo/EGNOS | Lignes directrices | EUROCAE      | Lignes directrices relatives à l'utilisation de solutions multi-GNSS pour les UAS — Risque moyen   | 2024       | Couvre l'utilisation des GNSS pour les exploitations de drones à risque moyen  |
| Navigation maritime           | EGNOS         | Norme              | CEI          | Norme d'essai pour les équipements de réception SBAS (L1) embarqués  | 2023       | <a href="#">CEI 61108-7</a>  |
| Navigation maritime           | EGNOS         | Règlement          | UE           | Mise à jour du <a href="#">règlement d'exécution (UE) 2022/1157 relatif aux exigences de conception, de construction et de performance et aux normes d'essai applicables aux équipements marins</a> y incluant les SBAS (L1) | 2023-2024  | 1 an après la norme d'essai applicable aux SBAS<br><br>La mise à jour du règlement doit inclure des références aux normes CEI 61108-7, CEI 61108-1, OMI MSC 401 et OMI MSC 112 |
| Navigation maritime           | Galileo       | Norme              | OMI          | Mise à jour de la norme de performance pour les équipements de réception Galileo embarqués   | 2023-2024  | Mise à jour du projet de proposition OMI MSC 233 soumis pour information lors de la 10 <sup>e</sup> réunion du NCSR de l'OMI   |
| Navigation maritime           | Galileo       | Norme              | CEI          | Mise à jour de la norme d'essai pour les équipements de réception Galileo embarqués  | 2025-2026  | Mise à jour de la norme CEI 61108-3  |
| Navigation maritime           | Galileo       | Règlement          | UE           | Mise à jour du <a href="#">règlement d'exécution (UE) 2022/1157 relatif aux exigences de conception, de construction et de performance et aux normes d'essai applicables aux équipements marins</a> y incluant Galileo       | 2025-2026  | Mise à jour de la résolution MSC de l'OMI et version 2.0 de la norme CEI 61108-3   |

| Segment de marché     | Système       | Type                | Organisation | Objet  | Calendrier     | Remarques   |
|-----------------------|---------------|---------------------|--------------|--|----------------|---|
| Navigation maritime   | EGNOS         | Norme               | OMI          | Norme de performance pour les équipements de réception bifréquences et multiconstellations SBAS + ARAIM embarqués  | 2025           | Proposition à soumettre lors de la 107 <sup>e</sup> réunion du MSC en mai 2023  |
| Navigation maritime   | EGNOS         | Norme               | CEI          | Norme d'essai pour les équipements de réception bifréquences et multiconstellations SBAS + ARAIM embarqués   | 2027           | 2 ans après la norme de performance applicable aux équipements de réception bifréquences et multiconstellations SBAS + ARAIM  |
| Navigation maritime   | EGNOS         | Règlement           | UE           | Mise à jour du <a href="#">règlement d'exécution (UE) 2022/1157 relatif aux exigences de conception, de construction et de performance et aux normes d'essai applicables aux équipements marins</a> y incluant les équipements de réception bifréquences et multiconstellations SBAS + ARAIM | 2027-2028      | 1 an après la norme d'essai applicable aux équipements de réception bifréquences et multiconstellations SBAS + ARAIM  |
| Navigation intérieure | Galileo/EGNOS | Règlement           | UE           | Mise à jour du <a href="#">standard européen pour les services d'information fluviale, ES-RIS 2021/1</a>   | Tous les 2 ans | Des dispositions spécifiques en matière de PNT et de GNSS pourraient être couvertes.  |
| Navigation intérieure | Galileo/EGNOS | Action préparatoire | UE           | Données spatiales de l'UE pour des navires autonomes sur les voies navigables intérieures  | 2023-2025      | Cette action évaluera comment les données spatiales de l'UE provenant de Galileo, d'EGNOS et de Copernicus peuvent être des facilitateurs essentiels pour la transformation numérique |
| Transport ferroviaire | Galileo/EGNOS | Norme               | AFE          | Spécification technique d'interopérabilité   | 2022-2028/2029 | Norme pour satisfaire aux exigences essentielles et assurer l'interopérabilité du système ferroviaire de l'UE   |

| Segment de marché | Système       | Type  | Organisation                             | Objet   | Calendrier | Remarques  |
|-------------------|---------------|-------|--|---|------------|--|
| Transport routier | EGNOS         | Norme | ETSI 3GPP                                | Mise à jour de la norme 3GPP  | 2024       | Évolution de la norme 3GPP pour la rendre conforme aux messages MOPS pour la diffusion bifréquence et multiconstellation des signaux GNSS par l'intermédiaire du réseau mobile |
| Transport routier | Galileo       | Norme | ETSI/CEN                                 | Norme d'essai pour les GNSS + HAIS  | 2024       | Ensemble d'essais et de bases de données normalisés (et, idéalement, certifiés) pour les GNSS + HAIS qui seraient utilisés pour la certification des services                  |
| Transport routier | Galileo/EGNOS | Norme | ISO                                      | Systèmes intelligents de transport — Service de système de conduite automatisée à vitesse réduite (CAVR) — Partie 2: Analyse des lacunes  | 2023-2024  |  |
| Transport routier | Galileo/EGNOS | Norme | ISO                                      | Systèmes de transport intelligents — Positionnement homogène pour le transport multimodal dans les stations ITS — Partie 1: Informations générales et définition de cas d'utilisation | 2024-2025  |  |
| Transport routier | Galileo/EGNOS | Norme | ISO                                      | Perception de télépéage — Communications d'augmentation de localisations pour systèmes autonomes  | 2024-2025  |  |
| Synchronisation   | Galileo       | Norme | CEN/CENELEC, comité technique conjoint 5 | Normes applicables au récepteur du temps de Galileo   | 2024-2025  |  |

## 8 APPENDICE D: Principales parties prenantes du PNT dans l'UE

### *Commission européenne (CE)*

La Commission européenne défend l'intérêt général de l'Union européenne et joue un rôle moteur dans les propositions législatives au Parlement européen et au Conseil, la gestion et la mise en œuvre des politiques de l'UE, l'application du droit de l'UE conjointement avec la Cour de justice et la négociation sur la scène internationale. Dans le cadre des programmes GNSS européens, la [Commission européenne](#) assume la **responsabilité globale** de la mise en œuvre du [programme spatial de l'UE](#), y compris dans le domaine de la sécurité. Elle **détermine les priorités et l'évolution à long terme** de ce programme, conformément aux exigences des utilisateurs, et **supervise** sa mise en œuvre.

La [direction générale de l'industrie de la défense et de l'espace \(DEFIS\)](#) dirige les activités de la Commission européenne dans le secteur de l'industrie de la défense et de l'espace. La Commission européenne veille à une répartition claire des tâches et des responsabilités entre les différentes entités intervenant dans le programme et coordonne les activités de ces entités. Elle veille également à ce que toutes les entités chargées de participer à la mise en œuvre du programme protègent les intérêts de l'Union européenne, garantissent la bonne gestion des fonds de l'Union européenne et observent le [règlement financier](#).

Les services et agences exécutives de la Commission européenne ont leur siège à Bruxelles, en Belgique, et à Luxembourg.

### *Agence de l'Union européenne pour le programme spatial (EUSPA)*

L'EUSPA est l'[Agence de l'Union européenne pour le programme spatial](#). Cette agence opérationnelle, dont le siège se trouve à Prague, a pour principale mission de mettre en œuvre le programme spatial de l'UE et de fournir des services spatiaux fiables, sûrs et sécurisés, en maximisant leurs avantages socio-économiques pour la société et les entreprises européennes.

En ce qui concerne les activités de Galileo et d'EGNOS, les tâches centrales de l'EUSPA consistent à assurer l'**homologation de sécurité** de ces systèmes et à mener pour leurs services des activités de **communication**, de **développement du marché** et de promotion. Les tâches confiées à l'EUSPA consistent à **gérer l'exploitation d'EGNOS et de Galileo** et à mener des activités liées au **développement d'applications en aval** fondées sur les données et les services fournis par Galileo et EGNOS.

L'EUSPA a son siège à Prague, en République tchèque.

### *Agence spatiale européenne (ESA)*

L'[Agence spatiale européenne \(ESA\)](#) est une organisation internationale qui compte 22 États membres et avec laquelle tous les États membres de l'Union européenne qui n'en sont pas membres ont conclu des accords de coopération officiels. L'ESA a pour objectif d'assurer et de promouvoir, à des fins exclusivement pacifiques, la coopération entre les États européens dans le domaine de la recherche et de la technologie spatiales et de leurs applications spatiales, en vue d'une utilisation à des fins scientifiques et dans des systèmes d'applications spatiales opérationnels.

En ce qui concerne Galileo et EGNOS, les tâches confiées à l'ESA consistent à **faire évoluer ces systèmes et à concevoir et développer** les composantes du segment terrestre et les satellites, y compris leurs essais et leur validation, et à mener des activités de **recherche et de développement en amont** dans ses domaines d'expertise.

Parallèlement à ses activités concernant Galileo et EGNOS, l'ESA mène plusieurs programmes de R&D visant à préparer des technologies pour les principaux systèmes et leurs applications. Les deux principaux programmes de l'ESA dans ce domaine qui sont liés au PNT sont le [programme d'évolution des GNSS européens \(EGEP\)](#) et le [programme d'innovation et de soutien à la navigation \(NAVISP\)](#).

Le siège de l'ESA se trouve à Paris, en France.

## Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne (AESA)

Composée de 31 États membres (les 27 États membres de l'Union européenne plus la Suisse, la Norvège, l'Islande et le Liechtenstein), l'[Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne \(AESA\)](#) est une **agence de l'Union européenne** qui s'est vu confier des **tâches réglementaires et exécutives** spécifiques dans le domaine de la **sécurité aérienne**.

La **mission** de l'AESA est de promouvoir les **normes communes les plus élevées en matière de sécurité et de protection de l'environnement** dans l'aviation civile. L'AESA élabore des règles communes en matière de sécurité et d'environnement au niveau européen et assiste la Commission européenne dans la mise en œuvre de ces règles, en lui apportant le soutien technique, scientifique et administratif nécessaire à l'accomplissement de ses tâches. L'AESA surveille également la mise en œuvre des normes au moyen d'inspections dans les États membres, fournit le savoir-faire technique nécessaire et mène des activités de formation et de recherche.

Le siège de l'AESA se trouve à Cologne, en Allemagne.

## Eurocontrol

[Eurocontrol](#) est une organisation civilo-militaire paneuropéenne chargée de **soutenir l'aviation européenne** en œuvrant à une gestion paneuropéenne harmonisée du trafic aérien. Elle compte 41 États membres disposant d'une **expertise européenne vitale en matière de gestion du trafic aérien (ATM)**. Elle est à l'initiative d'améliorations de la gestion du trafic aérien dans toute l'Europe et aide les États membres à les mettre en œuvre. Entre autres activités, Eurocontrol soutient la Commission européenne, l'AESA et les autorités nationales de surveillance dans leurs activités réglementaires, y compris pour la mise en œuvre des technologies concernant les GNSS.

Le siège d'Eurocontrol se trouve à Bruxelles, en Belgique.

## Entreprise commune SESAR

L'[entreprise commune SESAR](#) a été créée en tant que partenariat public-privé en vertu du [règlement \(CE\) n° 219/2007 du Conseil](#). Le [règlement \(UE\) 2021/2085 du Conseil](#) a marqué le lancement officiel de l'entreprise commune SESAR 3, qui rassemble **l'UE, Eurocontrol et plus de 50 organisations du secteur de l'aviation** (parties prenantes civiles et militaires, fournisseurs de services de navigation aérienne, aéroports, équipementiers, autorités et communauté scientifique).

**L'entreprise commune SESAR est chargée de moderniser le système européen de gestion du trafic aérien en coordonnant tous les efforts de recherche et d'innovation pertinents pour ce domaine** dans l'UE. Elle est responsable de la mise en œuvre du [plan directeur ATM européen](#) et de la réalisation d'activités spécifiques visant à développer le système de gestion du trafic aérien de nouvelle génération, capable d'assurer un transport aérien européen sûr, écologique et fluide au cours des trente prochaines années. L'entreprise commune SESAR 3 investira plus de 1,6 milliard d'EUR entre 2022 et 2030 pour accélérer, par la recherche et l'innovation, la mise en place d'un ciel numérique européen inclusif, résilient et durable.

L'entreprise commune SESAR a son siège à Bruxelles, en Belgique.

## Agence européenne pour la sécurité maritime (AESM)

L'[Agence européenne pour la sécurité maritime \(AESM\)](#) fournit à la Commission européenne, aux États membres, à l'Islande et à la Norvège une assistance et un soutien techniques concernant **l'élaboration et la mise en œuvre de la législation de l'UE sur la sécurité maritime**, la pollution causée par les navires, les installations pétrolières et gazières, la lutte contre la pollution par les hydrocarbures, la sûreté des navires et des ports, la surveillance des navires et l'identification et le suivi des navires à longue distance.

L'AESM **assure la vérification et le suivi de la mise en œuvre de la législation et des normes de l'UE**. Elle fournit une assistance technique et des conseils scientifiques sur des questions relatives aux normes de sécurité des navires et soutient le renforcement des capacités en mettant à disposition son savoir-faire, en organisant des

formations et la recherche, en veillant à la coopération et en fournissant des outils. L'AESM participe également à la diffusion des bonnes pratiques et à la promotion du transport maritime durable, y compris la mise en œuvre et l'application de la législation internationale et européenne existante ou proposée, et **collabore avec de nombreux organismes publics et parties prenantes du secteur**, en étroite coopération avec la Commission européenne et les États membres.

Le siège de l'AESM se trouve à Lisbonne, au (Portugal).

## **Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer (AFE)**

L'[Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer \(AFE\)](#) a pour mission de «faire de l'Europe un système ferroviaire durable et sûr, sans frontières». Dans ce but, **elle contribue, sur le plan technique, à la mise en œuvre de la législation de l'Union européenne** visant à améliorer la position concurrentielle du secteur ferroviaire en **renforçant le niveau d'interopérabilité des systèmes ferroviaires**, en développant une approche commune en matière de sécurité du système ferroviaire européen et en contribuant à la réalisation d'un espace ferroviaire européen unique sans frontières et **garantissant un niveau de sécurité élevé**.

**Des systèmes de navigation et de positionnement des trains fondés sur des applications satellitaires comptent parmi les futurs composants du sous-système «contrôle-commande et signalisation» dans le secteur ferroviaire.** Par conséquent, l'AFE fixe les règles pour leur approbation, en tenant compte des essais menés par les opérateurs ferroviaires et des évolutions des systèmes, le tout sous l'égide de l'entreprise commune [Shift2Rail](#), à laquelle l'AFE est associée et qui est la première initiative ferroviaire européenne visant à rechercher à la fois des solutions de R&D et des solutions de marché en accélérant l'intégration de technologies nouvelles et avancées dans des solutions de produits ferroviaires innovants.

L'AFE est implantée à Valenciennes et à Lille, en France.

## **Forum européen de radionavigation maritime (EMRF)**

Le Forum européen de radionavigation maritime (EMRF) **représente les intérêts maritimes en Europe et apporte une contribution d'experts à la politique européenne** concernant la sécurité de la navigation et des questions connexes.

L'EMRF rassemble différents organismes, allant des administrations maritimes aux organisations d'armateurs, afin de se concentrer sur la coordination des **intérêts maritimes européens dans le domaine des systèmes de radionavigation** en vue de leur développement en Europe. En particulier, l'EMRF mène différentes activités ayant trait à l'utilisation des systèmes mondiaux de navigation par satellite, notamment les améliorations du positionnement et des procédures connexes que Galileo et EGNOS peuvent apporter dans le domaine maritime.

L'un des principaux objectifs de l'EMRF consiste à promouvoir les **exigences maritimes relatives à l'évaluation de la sécurité et à la certification des futurs systèmes satellitaires** et de leurs systèmes de renforcement et de repli, et à préparer les documents permettant la reconnaissance et l'approbation opérationnelle de ces systèmes dans le cadre du système mondial de radionavigation de l'OMI.

## **États membres**

Au cœur de l'UE se trouvent ses [27 États membres](#) et leurs citoyens. La particularité de l'UE réside dans le fait que, si ses États membres restent tous souverains et indépendants, ils mettent en commun une partie de leur souveraineté dans des domaines où cette collaboration apporte une valeur ajoutée.

Le rôle des États membres en matière de PNT comprend le soutien et la participation à l'élaboration et à la mise en œuvre de la réglementation, des politiques et des actions dans ce domaine, la coordination avec les autres États membres et les institutions de l'UE et la contribution au développement de nouvelles technologies et applications PNT.

Les États membres participent au PNT à différents niveaux:



- en tant qu'utilisateurs principaux du PRS de Galileo et en tant qu'autorités chargées des opérations de recherche et de sauvetage;
- par l'intermédiaire des agences spatiales nationales, qui jouent un rôle clé pour les programmes GNSS européens;
- par l'intermédiaire des agences nationales du spectre, qui gèrent le spectre des radiofréquences, assurent la coordination et interviennent en cas d'incident de RFI;
- par l'intermédiaire des ministères des transports, qui soutiennent et supervisent l'utilisation des applications de sauvegarde de la vie fondées sur les GNSS dans différents domaines tels que l'aviation et le transport maritime.

Enfin, les États membres soutiennent la gestion des situations d'urgence en cas d'incident de RFI majeur ou d'indisponibilité des GNSS, ce qui est essentiel à la coordination entre les parties prenantes concernées.

### *Autres parties prenantes*

Les parties prenantes suivantes sont également pertinentes pour les services PNT:

- [l'Agence européenne de défense \(AED\)](#);
- [l'Organisation de l'aviation civile internationale \(OACI\)](#);
- [l'Organisation maritime internationale \(OMI\)](#);
- [l'Association internationale de signalisation maritime \(IALA\)](#).

## 9 APPENDICE E: Repères de référence de l'UE

Le **positionnement par GNSS s'appuie sur un système de référence terrestre** (TRS, fondé sur des principes mathématiques et physiques pour sa définition et ses propriétés) et sur un **repère de référence terrestre** (TRF, réalisation numérique du TRS). Le repère le plus utilisé est le [repère international de référence terrestre \(ITRF\)](#), qui est essentiel pour la surveillance continue des mouvements des plaques tectoniques de la Terre (1,5 cm/an pour la majeure partie de l'Europe) ou du niveau moyen de la mer au moyen de stations de référence à fonctionnement continu (CORS), qui localisent sans interruption les récepteurs GNSS.

Depuis des siècles, chaque pays maintient la transformation de sa grille locale et de sa cartographie (c'est-à-dire l'adaptation au mieux d'une carte 2D d'un pays sur un ellipsoïde terrestre), afin de réduire les erreurs dues à la transformation au moyen d'un facteur d'échelle variable. Ces grilles nationales ont été physiquement établies à l'aide de points trigonométriques. Actuellement, les **services de cartographie nationaux** abandonnent l'approche classique et **utilisent largement le RTK en réseau**, géré par un réseau de CORS et donc fondé sur les GNSS.

Cette tendance à l'utilisation des GNSS comme référence mondiale devrait se propager à tous les aspects du PNT, en raison notamment de l'augmentation escomptée à l'avenir du nombre de services PNT haute précision. L'approche fondée sur le facteur d'échelle étant sensible aux erreurs humaines, on observe, y compris pour les travaux de cartographie et d'ingénierie terrestre, une transition des grilles nationales à des grilles locales exploitant les GNSS (généralement selon la [transformation de Helmert](#)).

Le présent appendice dresse la liste des repères de référence terrestres les plus importants du point de vue européen et donne des conseils de bonne pratique simples en ce qui concerne leur utilisation.

### *Repères de référence*

Le [système international de référence terrestre \(ITRS\)](#) a été mis au point par la communauté géodésique sous les auspices du [Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence \(IERS\)](#). Sa réalisation la plus précise est le [repère international de référence terrestre \(ITRF\)](#), qui est en réalité une série de versions améliorées de l'ITRF. La dernière version est l'ITRF2020, même si certains ITRF antérieurs (n'allant généralement pas au-delà de l'ITRF2000) peuvent encore être utilisés. La [transformation d'un repère à un autre est possible](#) si la définition et les époques des deux repères sont connues. Tandis que les repères antérieurs pouvaient varier l'un de l'autre en décimètres, depuis l'ITRF94 (depuis l'ITRF2005 pour l'élément de la hauteur), les différences se mesurent en millimètres. L'effet le plus important, dont l'époque d'établissement tient compte, est le mouvement des plaques tectoniques.

Galileo utilise le [repère de référence terrestre Galileo \(GTRF\)](#), réalisé par le [fournisseur de services de référence géodésique de Galileo](#) et géré depuis 2018 par l'opérateur de services Galileo (GSO). La dernière solution de GTRF ([GTRF19v01](#)) est alignée sur l'ITRF2014 avec une précision millimétrique. D'autres GNSS sont également alignés sur l'ITRF et tous coïncident actuellement avec l'ITRF2014.

L'[ETRS89 \(système de référence terrestre européen 1989\)](#) repose sur l'ITRF89 à l'époque 1989.0 et est contrôlé par un réseau d'environ 250 stations de suivi GNSS à fonctionnement continu formant le [réseau permanent EUREF](#). L'ETRS89 étant maintenu à l'époque 1989.0, l'ETRS89 et l'ITRS divergent en raison de la dérive du continent européen (environ 2,5 cm par an). Au début de 2023, cette différence dépassait 80 centimètres.

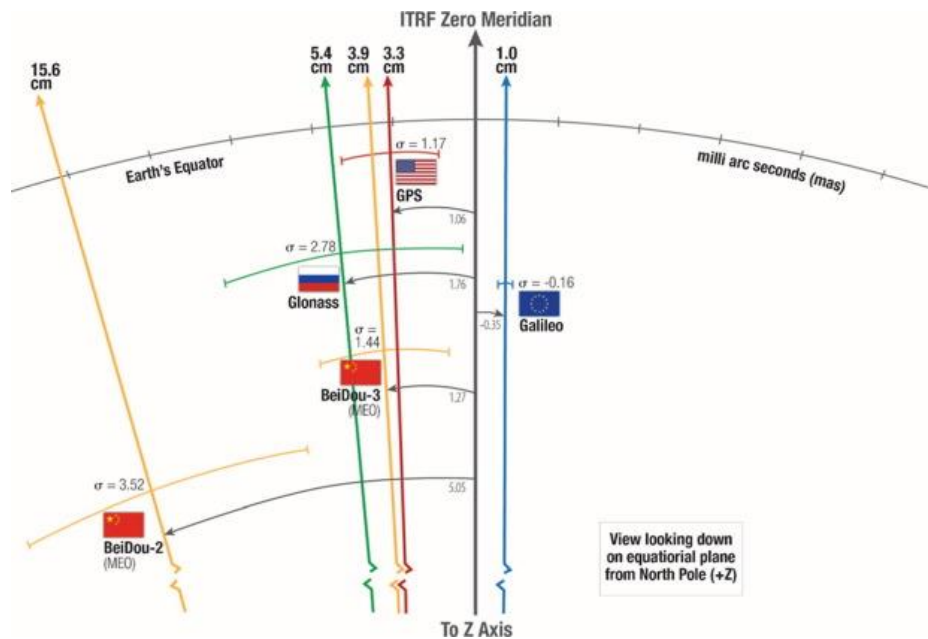


Illustration 66 — Comparaison entre le premier méridien tel que réalisé par le TRF des GNSS et le méridien zéro de l'IGS14 (source: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117720308292>)

De plus amples informations sur les repères de référence, leurs transformations et les produits de l'IGS sont disponibles dans les ouvrages suivants:

- P. Teunissen et O. Montenbruck, *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer International Publishing, 2017;
- Y. J. Morton, F. S. T. Van Diggelen, J. J. Spilker, et B. W. Parkinson, éd., *Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: Integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications*, première édition. Hoboken: Wiley/IEEE Press, 2021.

## Bonne pratique

Sur la base de ce qui précède, en règle générale, **toutes les coordonnées doivent être rapportées à un ITRF spécifique**, à l'époque d'établissement spécifique. Pour la majeure partie de l'Europe continentale, l'ETRS89 est le remplacement parfait. Dans certaines régions d'activité tectonique accrue, comme la Grèce, la transformation nécessite de connaître les vitesses locales. Cela exclut toute discontinuité due aux tremblements de terre (les points doivent être rétablis).

Dans le cas d'un système fondé sur les GNSS, il convient de signaler que les repères de référence du RTK en réseau et du PPP ont tendance à diverger. En Europe, la plupart des CORS du RTK en réseau sont définies dans l'ETRF89, de même que les coordonnées finales. Dans le cas du PPP, le repère de référence terrestre sera défini par le datum des corrections, généralement le dernier ITRF. De même, le repère de référence EGNOS est déterminé par les coordonnées géodésiques des stations EGNOS (stations de télémétrie et de contrôle d'intégrité EGNOS), qui sont établies dans l'[ITRF2000](#).

Dans le cas des systèmes terrestres, seuls les déploiements à petite échelle (moins de 10 km<sup>2</sup>) et à l'intérieur des bâtiments devraient utiliser la mise en œuvre de grilles locales, pour autant que les coordonnées soient reliées à l'ETRF (ITRF y compris l'époque de transformation). Des grilles locales GNSS selon la [transformation de Helmert](#) sont suggérées.

Pour un déploiement à plus grande échelle, il convient d'utiliser directement l'ETRF/l'ITRF. À noter que l'utilisation de coordonnées mondiales n'est pas intuitive (la distance latitude/longitude varie en fonction de la longitude et l'élément de hauteur du XYZ cartésien est difficile à lire), de sorte que les coordonnées locales seront probablement utilisées pour la visualisation (mais pas pour le système sous-jacent).

## 10 APPENDICE F: ACRONYMES

Le tableau suivant contient une liste d'acronymes:

|                |   |         |  |
|----------------|---|---------|--|
| ABAS           | Système de renforcement fondé sur les aéronefs ( <i>Aircraft-Based Augmentation System</i> )  | ESA     | Agence spatiale européenne   |
| ACAS           | CAS assisté ( <i>Assisted CAS</i> )   | ETCS    | Système européen de contrôle des trains ( <i>European Train Control System</i> )   |
| ADS-B          | Surveillance dépendante automatique en mode diffusion ( <i>Automatic Dependent Surveillance - Broadcast</i> )   | ETSI    | Institut européen des normes de télécommunications   |
| AIS            | Système d'identification automatique ( <i>Automatic Identification System</i> )   | EUSPA   | Agence de l'Union européenne pour le programme spatial   |
| ARAIM          | Contrôle autonome avancé de l'intégrité par le récepteur ( <i>Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i> )   | FAA     | Agence fédérale de l'aviation des États-Unis ( <i>Federal Aviation Authority</i> )   |
| ASF            | Facteur secondaire supplémentaire ( <i>Additional Secondary Factor</i> )  | FCC     | Commission fédérale des communications des États-Unis ( <i>Federal Communications Commission</i> )                                   |
| ATC            | Contrôle de la circulation aérienne ( <i>Air Traffic Control</i> )  | FDMA    | Accès multiple par répartition en fréquence ( <i>Frequency Division Multiple Access</i> )  |
| ATM            | Gestion du trafic aérien ( <i>Air Traffic Management</i> )  | FOC     | Capacité opérationnelle complète ( <i>Full Operation Capability</i> )  |
| AtoN           | Aides à la navigation ( <i>Aids-to-Navigation</i> )   | G2G     | Deuxième génération de Galileo   |
| BVLOS          | Au-delà de la portée optique ( <i>Beyond Visual Line of Sight</i> )   | GBAS    | Système de renforcement au sol ( <i>Ground-Based Augmentation System</i> )   |
| CAS            | Service d'authentification commercial ( <i>Commercial Authentication Service</i> )  | GEO     | Orbite géostationnaire ( <i>Geostationary Earth Orbit</i> )  |
| CBA            | Analyse coûts-avantages ( <i>Cost-Benefit Analysis</i> )  | SIG     | Système d'information géographique   |
| CDMA           | Accès multiple par répartition en code ( <i>Code Division Multiple Access</i> )   | GIVE    | Erreur à la verticale des points de grille ionosphérique ( <i>Grid Ionospheric Vertical Error</i> )                                  |
| CER            | Communauté européenne du rail   | GLA     | Organismes britannique et irlandais chargés de la gestion des phares ( <i>General Lighthouse Authorities of the UK and Ireland</i> ) |
| CNI            | Infrastructure nationale critique ( <i>Critical National Infrastructure</i> )   | GLONASS | Globalnaïa Navigatsionnaïa Spoutnikovaïa Sistéma   |
| CNS            | Communications, navigation et surveillance  | GMDSS   | Système mondial de détresse et de sécurité en mer ( <i>Global Maritime Distress and Safety System</i> )                              |
| COG            | Route sur le fond ( <i>Course Over Ground</i> )   | GNSS    | Système mondial de navigation par satellite ( <i>Global Navigation Satellite System</i> )  |
| DFMC           | Bifréquence et multiconstellation ( <i>Dual-Frequency Multi-Constellation</i> )   | GPS     | Système de positionnement mondial ( <i>Global Positioning System</i> )   |
| DGNSS/<br>DGPS | Système mondial de navigation par satellite différentiel/Système de positionnement mondial différentiel ( <i>Differential Global Navigation Satellite System/Differential Global Positioning System</i> ) | GSC     | Centre de services GNSS ( <i>GNSS Service Centre</i> )   |

|       |  |         |  |
|-------|--|---------|--|
| DOP   | Affaiblissement de la précision ( <i>Dilution of Precision</i> )   | GSS     | Station de détection Galileo ( <i>Galileo Sensor Station</i> )   |
| AESA  | Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne   | HAL     | Limite d'alerte horizontale ( <i>Horizon Alert Limit</i> )   |
| CE    | Commission européenne  | HAS     | Service haute précision ( <i>High Accuracy Service</i> )   |
| EDAS  | Service d'accès aux données EGNOS ( <i>EGNOS Data Access Service</i> )   | HMI     | Information dangereusement trompeuse ( <i>Hazardously Misleading Information</i> )   |
| EGNOS | Système européen de navigation par recouvrement géostationnaire ( <i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i> ) | HPL     | Niveau de protection horizontal ( <i>Horizontal Protection Level</i> )   |
| EMRF  | Forum européen de radionavigation maritime ( <i>European Maritime Radio Navigation Forum</i> )                               | IALA    | Association internationale de signalisation maritime   |
| AFE   | Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer   | OACI    | Organisation de l'aviation civile internationale   |
| ERNP  | Plan européen de radionavigation ( <i>European Radionavigation Plan</i> )  | ICG     | Comité international sur les GNSS ( <i>International Committee on GNSS</i> )   |
| ERTMS | Système européen de contrôle des trains ( <i>European Train Control System</i> )   | CEI     | Commission électrotechnique internationale   |
| IGS   | Service international des GNSS ( <i>International GNSS Service</i> )   | RNP     | Qualité de navigation requise ( <i>Required Navigation Performance</i> )   |
| OMI   | Organisation maritime internationale   | RPAS    | Système d'aéronef télépilote ( <i>Remotely Piloted Aircraft System</i> )   |
| IMU   | Unité de mesure inertielle ( <i>Inertial Measurement Unit</i> )  | RTCA    | Commission technique chargée des systèmes radio pour l'aéronautique ( <i>Radio Technical Commission for Aeronautics</i> )  |
| IdO   | Internet des objets  | RTCM    | Organisation internationale relative aux aspects maritimes des systèmes de radionavigation et de radiocommunication ( <i>Radio Technical Commission Maritime</i> ) |
| ISM   | Message de soutien à l'intégrité ( <i>Integrity Support Message</i> )  | RTK     | Positionnement cinématique en temps réel ( <i>Real Time Kinematic</i> )  |
| STI   | Systèmes de transport intelligents   | SAR     | Recherche et sauvetage   |
| UIT   | Union internationale des télécommunications  | SARP    | Normes et pratiques recommandées ( <i>Standards And Recommended Practices</i> )  |
| JRC   | Centre commun de recherche   | SAS     | Service d'authentification des signaux ( <i>Signal Authentication Service</i> )  |
| LBS   | Service dépendant de la localisation ( <i>Location-Based Service</i> )   | SBAS    | Système de renforcement satellitaire ( <i>Satellite-Based Augmentation System</i> )  |
| LEO   | Orbite terrestre basse ( <i>Low Earth Orbit</i> )  | SDD     | Document définissant un service ( <i>Service Definition Document</i> )   |
| LIDAR | Détection et télémétrie par la lumière ( <i>Light Detection and Ranging</i> )  | SES     | Ciel unique européen ( <i>Single European Sky</i> )  |
| MEO   | Orbite terrestre moyenne ( <i>Medium Earth Orbit</i> )   | SESAR   | Recherche sur la gestion du trafic aérien dans le ciel unique européen ( <i>Single European Sky ATM Research</i> )   |
| MFMC  | Multifréquence et multiconstellation ( <i>Multi-Frequency Multi-Constellation</i> )  | SOG     | Vitesse sur le fond ( <i>Speed Over Ground</i> )   |
| MOPS  | Norme minimale de performance opérationnelle ( <i>Minimum Operational Performance Standard</i> )                             | SIS     | Signal dans l'espace ( <i>Signal In Space</i> )  |
| MSC   | Comité de la sécurité maritime ( <i>Maritime Safety Committee</i> )  | SoL/SOL | Sauvegarde de la vie ( <i>Safety Of Life</i> )   |

|       |   |       |   |
|-------|---|-------|---|
| MSI   | Service d'information dans le domaine de la sécurité maritime ( <i>Maritime Safety Information Service</i> )                                | SOLAS | Sauvegarde de la vie humaine en mer ( <i>Safety Of Life At Sea</i> )                  |
| NLOS  | Hors de portée optique ( <i>Non-Line of Sight</i> )   | SPP   | Positionnement à point unique ( <i>Single Point Positioning</i> )                     |
| INM   | Institut national de métrologie   | SSR   | Représentation de l'espace d'état ( <i>State Space Representation</i> )               |
| OS    | Service ouvert ( <i>Open Service</i> )  | STL   | Satellite Time and Location   |
| OSNMA | Service d'authentification des messages de navigation en libre service de Galileo ( <i>Open Service Navigation Message Authentication</i> ) | TEC   | Contenu électronique total ( <i>Total Electron Content</i> )                          |
| PBN   | Navigation fondée sur les performances ( <i>Performance-Based Navigation</i> )  | TOA   | Temps d'arrivée ( <i>Time of Arrival</i> )  |
| PNT   | Positionnement, navigation et synchronisation ( <i>Position, Navigation and Timing</i> )  | STI   | Spécification technique d'interopérabilité  |
| PPP   | Positionnement ponctuel précis ( <i>Precise Point Positioning</i> )   | TTA   | Délai de signalisation du dysfonctionnement ( <i>Time To Alarm</i> )                  |
| PRS   | Service public réglementé ( <i>Public Regulated Service</i> )   | TTF   | Délai d'obtention de la première position ( <i>Time To First Fix</i> )                |
| PVT   | Position, vitesse et temps ( <i>Position, Velocity and Time</i> )   | UAM   | Mobilité aérienne urbaine ( <i>Urban Air Mobility</i> )                               |
| QZSS  | Système satellitaire Quasi-Zénith ( <i>Quasi Zenith Satellite System</i> )  | UAS   | Système d'aéronef sans équipage à bord ( <i>Unmanned Aircraft System</i> )            |
| RAIM  | Contrôle autonome de l'intégrité par le récepteur ( <i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i> )                                       | UTC   | Temps universel coordonné ( <i>Universal Coordinated Time</i> )                       |
| RF    | Radiofréquence  | VAL   | Seuil d'alarme vertical ( <i>Vertical Alert Limit</i> )                               |
| RFI   | Interférence par radiofréquence ( <i>Radio Frequency Interference</i> )   | VDES  | Système d'échange de données en ondes métriques ( <i>VHF Data Exchange System</i> )   |
| RIMS  | Stations de contrôle d'intégrité de référence ( <i>Reference Integrity Monitoring Stations</i> )  | WAAS  | Système de renforcement à couverture étendue ( <i>Wide Area Augmentation System</i> ) |
| RLS   | Service de voie retour ( <i>Return Link Service</i> )   | WWRNS | Système mondial de radionavigation ( <i>World-Wide Radionavigation System</i> )       |