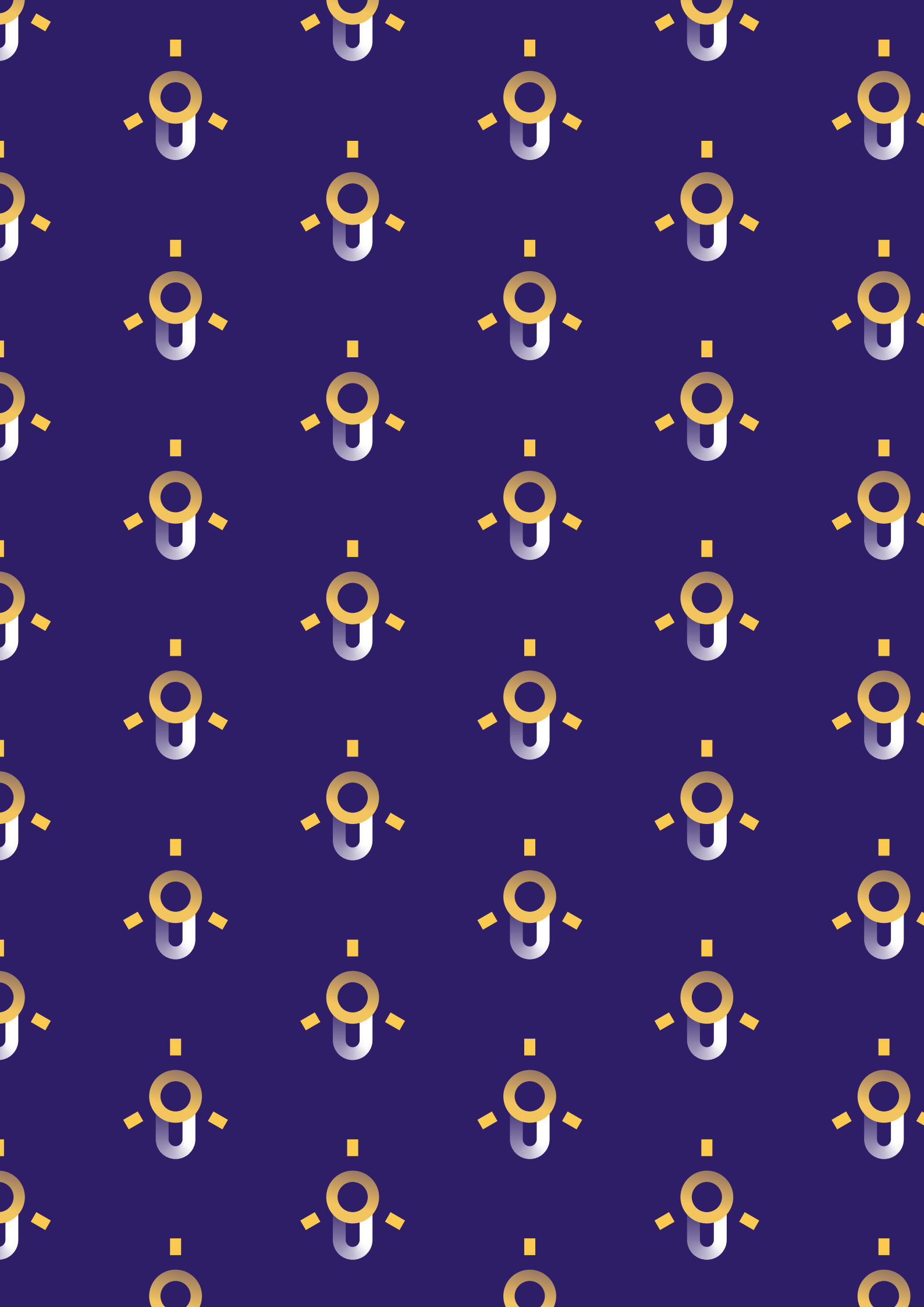




# Les données satellites pour la gestion des réseaux d'énergie





# Table des matières

<b>01</b>	<b>Contexte de l'étude</b>	6
	01. Principes et périmètres de l'étude	7
	02. Objectifs de l'étude	10
<b>02</b>	<b>Les données satellitaires au service des réseaux électriques</b>	11
<b>03</b>	<b>Aperçu des technologies satellitaires</b>	14
	01. Un mot sur les Systèmes de Positionnement Géographique (GPS)	15
	02. Dynamique des programmes et lancements de satellites	17
	03. Les différents domaines d'application des satellites	18
	04. Les orbites des satellites	18
	05. Les satellites d'observation de la Terre	20
	06. Les principales constellations de satellites d'observation	20
	07. Les résolutions et types de données satellitaires	22
	08. Les données SAR et la technique InSAR	25
	09. Disponibilité des données	27
	10. Coûts des images satellitaires	29
<b>04</b>	<b>Différents cas d'usage pour la gestion des réseaux électriques</b>	31
	01. Préambule	32
	02. Planification et déploiement des réseaux – l'accès à l'énergie	32
	2.1 Accès à l'énergie : planification des zones à électrifier	33
	2.2 Planification et déploiement des réseaux électriques	34
	2.3 Aperçu de projets et de programmes d'accès à l'énergie en Afrique	36
	03. Gestion de l'environnement des infrastructures et des événements climatiques	42
	3.1 Gestion des risques liés aux glissements de terrain	42
	3.2 La gestion des infrastructures face aux conditions météorologiques	44
	04. Opérations de maintenance et maintenance prédictive	46
	4.1 Les données satellitaires et les systèmes d'informations pour la maintenance	48
	05. Gestion de la végétation	49
	5.1 Dynamique de l'Imagerie Aérienne	53
<b>05</b>	<b>Les capteurs IoT Satellites</b>	56
<b>06</b>	<b>Exemples de projets</b>	59
	CPCS (Canada)	60
	ALTEIA (France)	61
	MASAE (France)	62

IGN avec IGO (France)	63
MÉTÉORAGE (France)	64
KAYRROS (France)	65
Schneider Electric (France)	66
HEXACODE (Canada)	67
RTE (France)	68
VIDA Place (Allemagne)	69
Enedis (France)	70
GE Vernova (France)	71
<b>07 Acteurs</b>	<b>72</b>
<b>08 Perspectives</b>	<b>75</b>
01. Taille du marché	76
02. Les limites et freins actuels	76
03. Perspectives	77
<b>09 Conclusion</b>	<b>79</b>
<b>10 Bibliographie</b>	<b>82</b>
<b>11 Programmes satellites et de services</b>	<b>85</b>
SCO: Space for Climate Observatory	86
Programme Copernicus	86
European Ground Motion Service	86
Programme CO3D	87
Programme LiDAR HD IGN	87
<b>12 Fournisseurs de données satellitaires</b>	<b>89</b>
01. Planet Labs	90
02. Google	90
03. ICEYE	92
<b>13 Annexes</b>	<b>93</b>
01. Glossaire	94
02. Annexes	96

# Remerciements

Nous tenons à remercier les contributeurs qui ont participé aux entretiens, ainsi que les membres du comité de lecture, sans qui la réalisation de cette étude n'aurait pas été possible. Leur expertise et leurs conseils ont été essentiels et la complémentarité se matérialisent ici dans ce travail collectif.

Merci donc à l'ensemble du panel :

- pour l'ESA et pour la Banque Mondiale : Alex ChUNET, Félicien Roquet.
- pour le CNES : Olivier Queyrut et Jean-Marc Delvit.
- pour CPCS : Romain Frandji.
- pour Enedis, Yves Barlier et Martial Joseph.
- pour Hexacode : Jean-Pierre Girard.
- pour GE Vernova Digital Grid : Benoit Pradaïrol et Sylvain Mandreau
- pour Immergis : Samuel Masson.
- pour Météorage et pour RTE : Michel Bena, Solal Bordenave.
- pour Schneider Electric : Baptiste Jouffroy.
- pour Vida place : Nabin Raj Gaihre et pour Zesco, Bwalya Chisulo.

Cette étude a été réalisée sous la plume de Philippe Tordjman. Les relecteurs sont Fabrice Creste et Nathan Grenier-Bellegarde de Yélé Consulting.

# 01

---

## Contexte de l'étude

**D**igital Energy est un programme mis en œuvre par l'Agence française de développement avec le soutien de l'Union européenne, dédié au développement de solutions innovantes et numériques au service d'une transition énergétique juste. Différentes études thématiques sont réalisées dans le cadre de ce programme portant sur les solutions digitales et innovantes pour le secteur énergétique.

#### **Digital Energy vise ainsi à :**

- Accélérer l'accès à l'énergie,
- Réduire la dépendance aux énergies fossiles,
- Améliorer l'efficacité opérationnelle des acteurs du secteur de l'électricité.

Digital Energy déploie une gamme d'instruments complémentaires pour soutenir les acteurs de l'énergie dans leur processus de digitalisation et, favorise la création de partenariats entre les opérateurs et les start-up.

► *Retrouvez plus d'information sur la plateforme [digital-energy.eu](https://digital-energy.eu)*

Ce rapport rend compte de la première étude thématique lancée en 2023, consacrée aux « Technologies innovantes autour des données géosatellitaires pour l'amélioration de la gestion des réseaux électriques. » Il s'inscrit plus largement dans les travaux de Digital Energy sur la « Gestion efficace des Réseaux ». Onepoint et AETS ont été chargés de la réalisation de cette étude par l'Agence française de développement.

## **01. Principes et périmètres de l'étude**

L'étude a débuté par une phase de cadrage au cours de laquelle ont été consultés un ensemble d'acteurs aux profils variés, incluant des utilisateurs et des fournisseurs. L'objectif était de constituer un panel complémentaire entre, d'une part, fournisseurs de solutions technologiques et de services (entreprises, start-ups, financeurs) et, d'autre part, des utilisateurs finaux tels que les compagnies d'électricité. Une première série d'entretiens a ainsi été menée afin de recueillir leurs éclairages sur leurs différentes solutions, problématiques, cas d'usage, ainsi que sur des exemples de projets.

Cette phase de cadrage a permis de déterminer et de sélectionner trois principaux sujets d'intérêt dans le domaine de la gestion efficace des réseaux, sur lesquels cette étude se concentre, à savoir :

- La planification et le déploiement des réseaux avec un regard sur les programmes d'accès à l'énergie ;
- La gestion des environnements des infrastructures et des risques naturels et climatiques ;
- La gestion des infrastructures et la maintenance prédictive.

L'étude met l'accent sur l'utilisation des données d'imagerie satellitaires, incluant les images optiques visibles et multispectrales ainsi que les données radar de type SAR (*Synthetic Aperture Radar*) et InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) qui seront détaillées par la suite. Elle aborde aussi l'usage des données dites terrestres et aériennes, comme les photographies aériennes ; ou les scanners lasers embarqués de type LiDAR (*Laser Imaging Detection And Ranging*), qui sont soit des alternatives aux solutions satellitaires, soit des briques complémentaires pour former des solutions complètes, dont les résultats sont exploitables avec suffisamment de précision. Aussi, un regard sera porté sur l'usage des capteurs terrestres et les échanges de données grâce aux capacités de télécommunication des satellites.

En synthèse, l'étude se penche sur l'utilisation combinée des données d'imagerie satellitaires, des photographies aériennes, des scanners LiDAR, et des capteurs terrestres, tout en tirant parti des capacités de télécommunication des satellites pour mettre en œuvre un large spectre de solutions intégrées et efficaces dans le secteur de l'énergie et des réseaux électriques.

Le tableau *ci-dessous* résume les applications développées ou utilisées, en présentant les technologies et les types de données satellitaires mises en avant par les entreprises interrogées lors des entretiens de cadrage.

	<b>Applications &amp; Usages principaux</b>	<b>Type de Technologies</b>	<b>Usage des données géo-satellitaires</b>
<b>ZESCO</b>	Planification et géolocalisation des actifs, Aide à la gestion des incidents	ArcGIS Arc FM	Utilisation de géocarte sur SIG Intérêt pour APM
<b>SCHNEIDER Electric</b>	Gestion de la végétation avec imagerie aérienne, Gestion de la performance des actifs (APM), Optimisation des opérations et investissement	Asset Performance Management / ArcFM	Utilisation de données géosatellitaires pour la visualisation
<b>IMMERGIS</b>	Relevés au sol, géoréférencement, caractérisation des infrastructures et environnants (sol, obstacles, végétation, etc.) en 2D et 3D	SCAN 2D/3D, LiDAR embarqués	Données géosatellitaires pour visualisation avec corrélation sur cartographie 2D/3D



	<b>Applications &amp; Usages principaux</b>	<b>Type de Technologies</b>	<b>Usage des données géo-satellites</b>
<b>HEXACODE</b>	Jumeau numérique de la condition de santé de type APM avec Analyses prédictives, statistiques, prescriptive (Optimisation Maintenance et Capex)	Plateforme APM temps réel	Visualisation de la condition opérationnelle et alarmes sur Geohash (Google, Leaflet Maps)
<b>CPCS</b>	Analyse multi-sources (photo, radar, géosatellites) par experts et outils IA pour recensement infra et états, rapprochement données réseau et client, évaluation des impacts travaux	Outils analyse, IA	Données géosatellites en Entrée pour analyse
<b>METEORAGE</b>	Analyse foudre, localisation précise pour évaluation des impacts sur l'état du réseau	Antenne électro-magnétique et Application localisation foudre	Corrélation avec données météo satellites pour prévision des foudres
<b>RTE</b>	Gestion de la Végétation (en Aérien), APM pour optimisation CAPEX	GIS, outils / projets RTE avec partenariat, LiDAR, Photo Aériennes	Utilisation données météométéo, Images satellites en visualisation
<b>VIDA</b>	Développement applications et Analyse données multi sources (géosatellites, aérien, cartographie, SIG) pour évaluation de l'impact sur les déploiements, des risques environnementaux et climatiques	Outils d'analyse, IA	Images satellites en entrée pour analyse et en visualisation
<b>ENEDIS</b>	Etude planning réseau, Construction jumeau numérique du réseau Maintenance prédictive (détection de défaut avec Linky, Big Data & AI pour estimation probabilité panne. Caractérisation d'usure (inspection et AI), Gestion de la végétation par visite hélico et drone	GIS Smallworld, IBM Maximo, + Projets Enedis	Images satellites en visualisation
<b>CNES</b>	Accompagnement au développement de projets. Exemples : Suivi végétation, risques et impacts incendie. Corrélation intensité lumière et consommation. Dénombrement Bâtiment. Surveillance zone de production sensible.	Données satellites, multispectrale et Radar	Images satellites en entrée pour analyse et en visualisation
<b>GE Vernova Digital Grid</b>	Planification et modélisation réseau. Gestion végétation. Prévision production renouvelable. Gestion de la performance des actifs et gestion des interventions	GIS SmallWorld pour planification,	Images satellites en entrée pour analyse et en visualisation
<b>IGN-FI</b>	Fusion données géosatellites, cartographie et aériennes, Identification de chantiers, ouvrages informels, Mesure précises d'élévation	Outils Analyse, Application RAFALE	Images géosatellites en entrée pour analyse et en visualisation avec cartographie

## 02. Objectifs de l'étude

Cette étude présente les principaux cas d'usage, les solutions et les acteurs utilisant des données satellitaires pour l'amélioration de la gestion des réseaux électriques. Une approche collaborative et dynamique a été mise en œuvre tout au long de sa réalisation. Au-delà des échanges sur les cas d'usage, les technologies, les opportunités et les défis, les nombreux et divers acteurs mobilisés ont également contribué aux phases de cadrage et de relecture de l'étude.

Cela s'explique notamment par la volonté de l'AFD de créer un espace de dialogue, avec *in fine* l'ambition de former une communauté d'acteurs (entreprises, institutions, start-ups, programmes de recherche, etc.) qui perdurera au-delà de l'étude et interagira autour du projet Digital Energy. C'est le sens de la plateforme [digital-energy.eu](https://digital-energy.eu) qui offre un espace d'échanges propice à la rencontre de différentes perspectives et à des applications concrètes de ces technologies.

# 02

---

## **Les données satellites au service des réseaux électriques**

**L'**utilisation des données, des images et des technologies satellitaires joue un rôle grandissant dans le secteur de l'énergie et des réseaux électriques. Elle répond aux besoins d'acteurs de plus en plus connectés, plaçant au cœur de leurs préoccupations la planification, l'optimisation des opérations, ainsi que la gestion et la prévention des risques techniques et environnementaux.

Cette étude aborde l'utilisation de l'imagerie au sens large, incluant les imageries visuelles et non visuelles, les technologies d'imagerie au sol ou aérienne en complément des données satellitaires, ainsi que les applications liées aux capacités de télécommunication des satellites.

Les satellites d'observation avec leurs équipements de télédétection embarqués sont capables de couvrir de vastes zones géographiques en un temps record et de manière régulière. Ils fournissent des informations inédites et précieuses aux analystes et aux gestionnaires de réseaux et de territoires. Les données satellitaires aident ainsi à optimiser la gestion des réseaux électriques aussi bien pour la production électrique que pour le transport et la distribution d'électricité.

Les apports des données satellitaires s'étendent des phases d'étude et de déploiement jusqu'à l'exploitation, dans différents domaines tels que :

- **La planification et le déploiement des réseaux**, car les satellites d'observation aident à planifier la construction d'infrastructures, à localiser les meilleurs sites pour l'installation des lignes, des postes et des centrales d'énergie renouvelable ainsi que les microgrids. En amont de cette planification, ils permettent d'identifier les zones à électrifier dans le cadre de programmes d'accès à l'énergie et de superviser le déploiement et l'avancement des projets.
- **La surveillance des actifs et des infrastructures**, car les satellites d'observation aident à surveiller, de manière régulière, l'état, la condition opérationnelle et l'intégrité des actifs comme les lignes, les pylônes, etc. Ils aident également à l'évaluation de l'empiètement de la végétation, des niveaux d'ensoleillement des centrales photovoltaïques et des niveaux des barrages hydro-électriques pour les prévisions de production, et ceci à des échelles locales, nationales et internationales.
- **La gestion des risques naturels**, car les satellites d'observation aident à modéliser et à détecter divers phénomènes climatiques et événements, tels que les tempêtes, les inondations, les incendies et les affaissements de terrain. Aussi, ils améliorent l'anticipation et l'évaluation des risques et des impacts opérationnels sur le fonctionnement des réseaux.

- **L'optimisation des interventions**, car les satellites d'observation aident à améliorer l'efficacité des opérations de maintenance. D'une part, ils sont utilisés pour le géoréférencement des infrastructures et la caractérisation de leurs zones environnantes sur des images de plus en plus détaillées; d'autre part, ils aident à prioriser et à cibler les lieux d'intervention des équipes de maintenance et de réparation après incidents.
- **L'utilisation des services de télécommunication des satellites** qui permettent l'échange de données en temps réel avec les différents capteurs de terrain sur les éléments du réseau électrique. Ces applications s'étendent de la mise en place de systèmes dédiés de télédétection de défauts, de mesures variées ou d'alarmes climatiques (feux, vents, etc.), jusqu'à la supervision complète des infrastructures électriques, notamment dans les zones où la couverture des moyens de télécommunication terrestre (radio, 3G, 4G) est faible ou inexistante.

En synthèse, l'usage des données, des images et des technologies satellitaires offre des opportunités considérables dans le secteur de l'énergie. Il peut notamment contribuer aux progrès de l'efficacité, de la sécurité et de la durabilité des réseaux électriques. Les technologies satellitaires viennent compléter la panoplie des solutions terrestres ou aériennes en termes de champ d'action, de rapidité, de précision et de coût. Elles s'insèrent dans une approche permettant de choisir « la bonne mesure au bon niveau », illustrée par la figure ci-dessous.

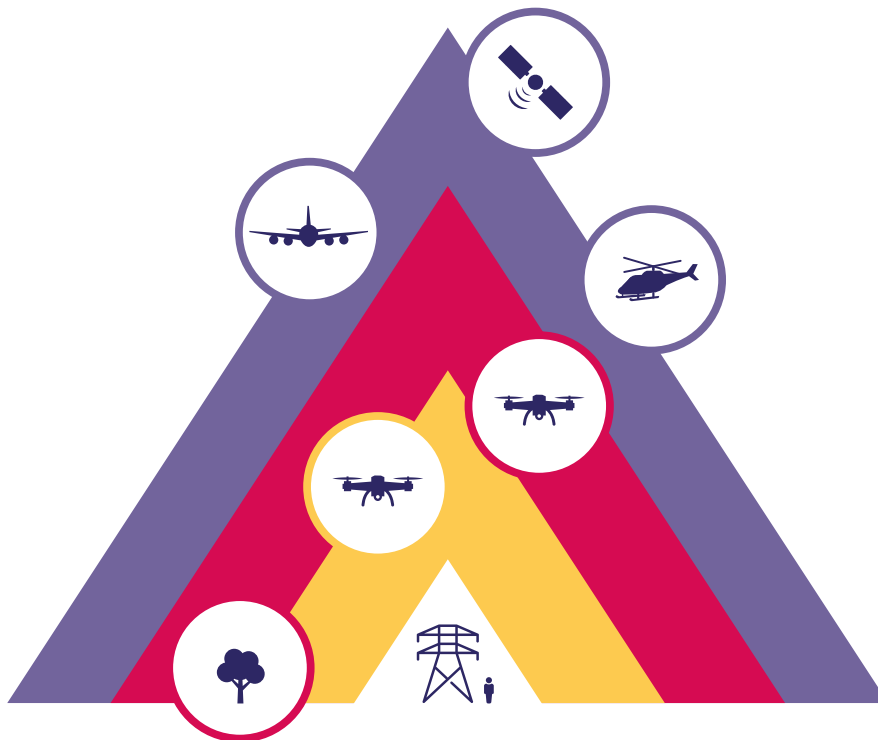


Fig. 01 La Bonne Mesure au bon niveau

# 03

---

## Aperçu des technologies satellitaires

**L**es technologies satellitaires sont diverses, tout comme leurs implications techniques et budgétaires. Ce chapitre débute par un point général sur le fonctionnement et les rôles des géo-positionnement par satellite (GPS). La dynamique des programmes et avec des lancements de satellites est ensuite explorée, en revenant sur les avancées récentes du secteur. Par la suite, seront présentés dans cette partie :

- Les différents domaines d'application des satellites,
- Les orbites des satellites,
- Les satellites d'observation de la Terre,
- Les principales constellations,
- Les résolutions et types de données,
- Les techniques avancées comme les données SAR (Radar à Synthèse d'Ouverture) et InSAR (Interférométrie SAR).

Dans un dernier temps seront décryptés les aspects liés à la disponibilité des données et les coûts associés.

## 01. Un mot sur les Systèmes de Positionnement Géographique (GPS)

Cette étude ne manquera pas d'évoquer au préalable le rôle des systèmes de positionnement par satellite, désignés sous le terme générique GNSS (Global Navigation Satellite Systems), dont les plus connus sont :

- **Le système GPS** (États-Unis), le plus ancien qui est utilisé en couverture mondiale avec une constellation de 31 satellites,
- **Le système GLONASS** (Russie) avec une constellation de 24 satellites,
- **GALILÉO** (Europe) avec une constellation de 24 satellites.

Outre ces principaux systèmes, il est possible de mentionner :

- **Beidou** (Chine) et en couverture régionale le système **QZSS** (Japon),
- **IRNSS** (Inde)

Le terme GPS (Global Positioning System), devenu une dénomination très commune, sera utilisé dans la suite de l'étude pour désigner les GNSS en général. Les systèmes GPS sont au cœur des performances actuelles de géolocalisation. La position sur le globe est calculée par triangulation, ou plus précisément par trilatération, une méthode

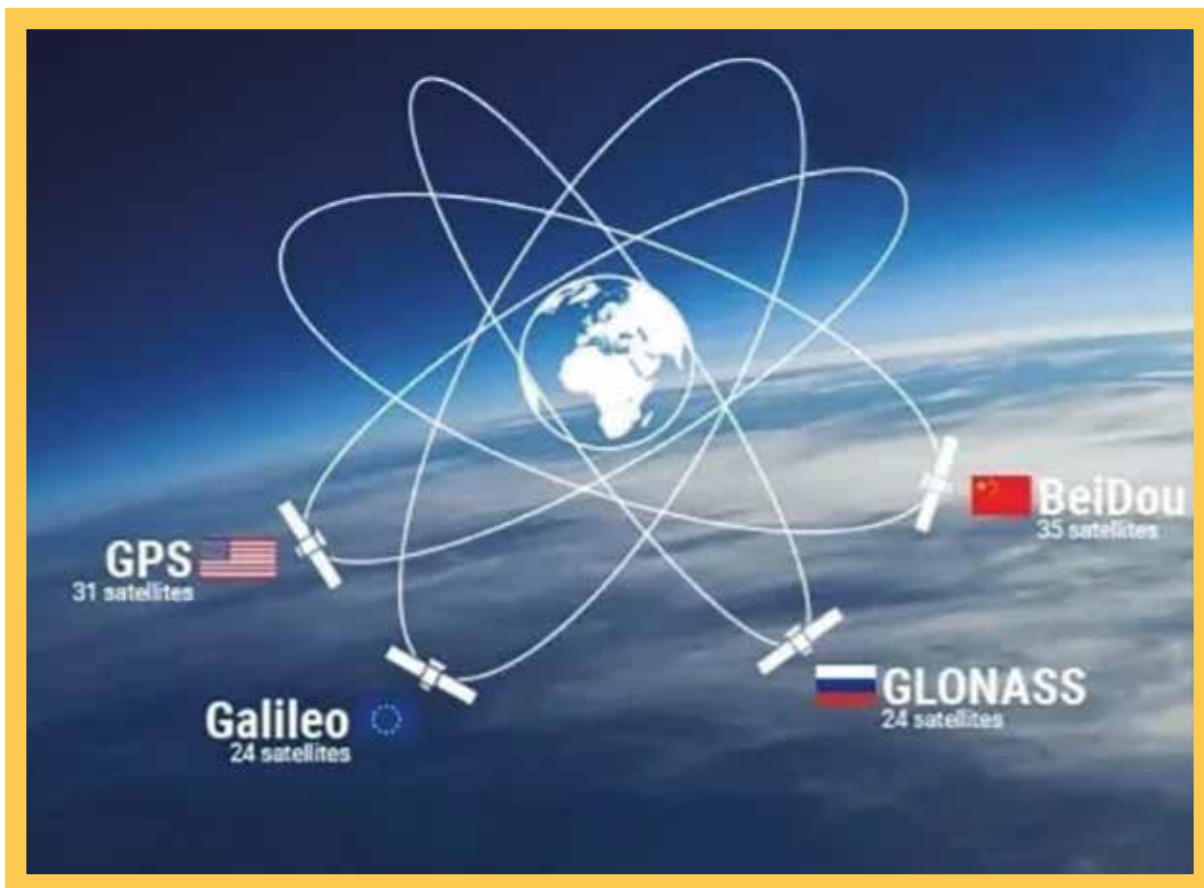


Fig. 01 Constellation GNSS, satellites de positionnement

de mesure des distances entre un récepteur GPS et plusieurs satellites en orbite autour de la Terre. Ces derniers émettent des signaux de type radio contenant des informations sur leurs positions et l'heure exacte d'émission. Chaque récepteur GPS terrestre, lui-même synchronisé à 10 nanosecondes près (ordre de grandeur), reçoit ces signaux et calcule le temps nécessaire à leur réception. En connaissant la vitesse de propagation des signaux (vitesse de la lumière), le récepteur peut déterminer la distance qui le sépare de chaque satellite. Pour déterminer une position précise en trois dimensions (latitude, longitude et altitude), le récepteur GPS doit recevoir les signaux d'au moins quatre satellites. Avec les distances mesurées, le récepteur utilise la géométrie pour trianguler sa position exacte en croisant les distances de chaque satellite et en calculant le point d'intersection.

Ces systèmes permettent ainsi de déterminer la position géographique d'un objet ou d'une personne équipée d'un récepteur GPS avec une précision de l'ordre du mètre ainsi que de calculer les vitesses de déplacement et d'assurer la synchronisation horaire des récepteurs. L'ensemble des applications utilisant ces informations de positionnement sont innombrables et pour certaines, bien connues du grand public comme Google Map, Waze, les GPS embarqués des voitures, les applications sportives sur montres



connectées, etc. Dans le domaine des réseaux électriques, les GPS ont aujourd'hui des rôles essentiels :

- Ils permettent de mettre à l'heure et de synchroniser avec une précision supérieure à la microseconde, sur le territoire d'un ou de plusieurs pays, l'ensemble des équipements électroniques installés sur les réseaux, ainsi que les productions centralisées (centrales thermiques, nucléaires, hydro-électriques) et décentralisées (parcs éoliens, centrales photovoltaïques, etc.). Ainsi, les systèmes d'automatisme et les centres de contrôle peuvent assurer les synchronismes inter-machines et inter réseaux, indispensables à la stabilité et à la bonne marche des réseaux électriques.

Parmi les équipements utilisant les signaux horaires synchrones, nous pouvons noter : les récepteurs horaires GPS et les servers NTP (Network Time Protocol) pour diffusion de la référence temps synchrone aux réseaux de télécommunications, les systèmes PMS (Phasors Measurement Systems), pour la surveillance du décalage de phases entre les différentes zones du réseau électrique et l'anticipation des risques de décrochage (utilisé par exemple dans les applications «Wide Area Monitoring» pour minimiser les risques de black-out).

- Les GPS permettent de géolocaliser et géoréférencer la plupart des équipements des infrastructures par relevé des coordonnées GPS et de les représenter précisément sur des supports photo-satellitaires et cartographiques dans des outils et bases de données, notamment les SIG, les bases de données cartographiques en ligne (OpenStreetMap, OpenInfraMap, etc.), Google Map, etc.
- Les GPS permettent la détermination des lieux et l'optimisation des parcours d'intervention sur site des équipes d'opération et de maintenance dans les applications d'aide à la maintenance de type WFM (Work Force Management), GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur) ou APM (Asset Performance Management).

## 02. Dynamique des programmes et lancements de satellites

Fin 2023, plus de 7 300 satellites opérationnels étaient en orbite, dont :

- Environ **1 200 dédiés à l'observation de la terre**,
- Environ **5 400 pour les télécommunications** (parmi lesquels plus de 3 600 appartenant à la constellation Starlink de SPACE X),
- Le reste pour l'observation spatiale, scientifique et le secteur militaire.

En termes de lancements, 2023 a été une année record avec 211 lancements réussis dans le monde, dont plus de 50 % réalisés par les Etats-Unis, principalement par SpaceX dans le cadre de la création de la constellation Starlink qui devrait contenir près de 12 000 satellites d'ici fin 2025.

Au total 2 900 satellites auront ainsi été mis en orbite en 2023, dont 2 253 pour les télécommunications et plus de 250 pour l'observation de la Terre.

### 03. Les différents domaines d'application des satellites

Les satellites peuvent être classés en différentes catégories et domaines d'application tels que :

- Les satellites **scientifiques** destinés à la recherche pour l'étude de la physique de la Terre (ionosphère, gravité, spectre électromagnétique, atmosphère, géodésie, etc.) et l'observation spatiale (astronomie, cosmologie, etc.)
- Les satellites **d'observation de la Terre**
- Les satellites **météorologiques**
- Les satellites de **communication** (internet et communication)
- Les satellites de **positionnement** (GNSS)
- Les satellites **à usage militaire**

Les applications et les cas d'usage qui seront présentés dans ce rapport s'appuient principalement sur les données et les images issues des satellites d'observation de la Terre. Cependant, les données météorologiques et les capacités de télécommunication des satellites sont également utilisées dans le secteur de l'énergie.

### 04. Les orbites des satellites

Les différentes orbites des satellites sont catégorisées ainsi :

#### **Orbite Terrestre Basse (LEO - Low Earth Orbit)**

- **Altitude** : 200 à 2 000 km au-dessus de la Terre.
- **Caractéristiques** : temps de révolution court (90 à 120 minutes), adapté pour l'observation de la Terre avec des hautes résolutions et certaines communications comme Starlink.

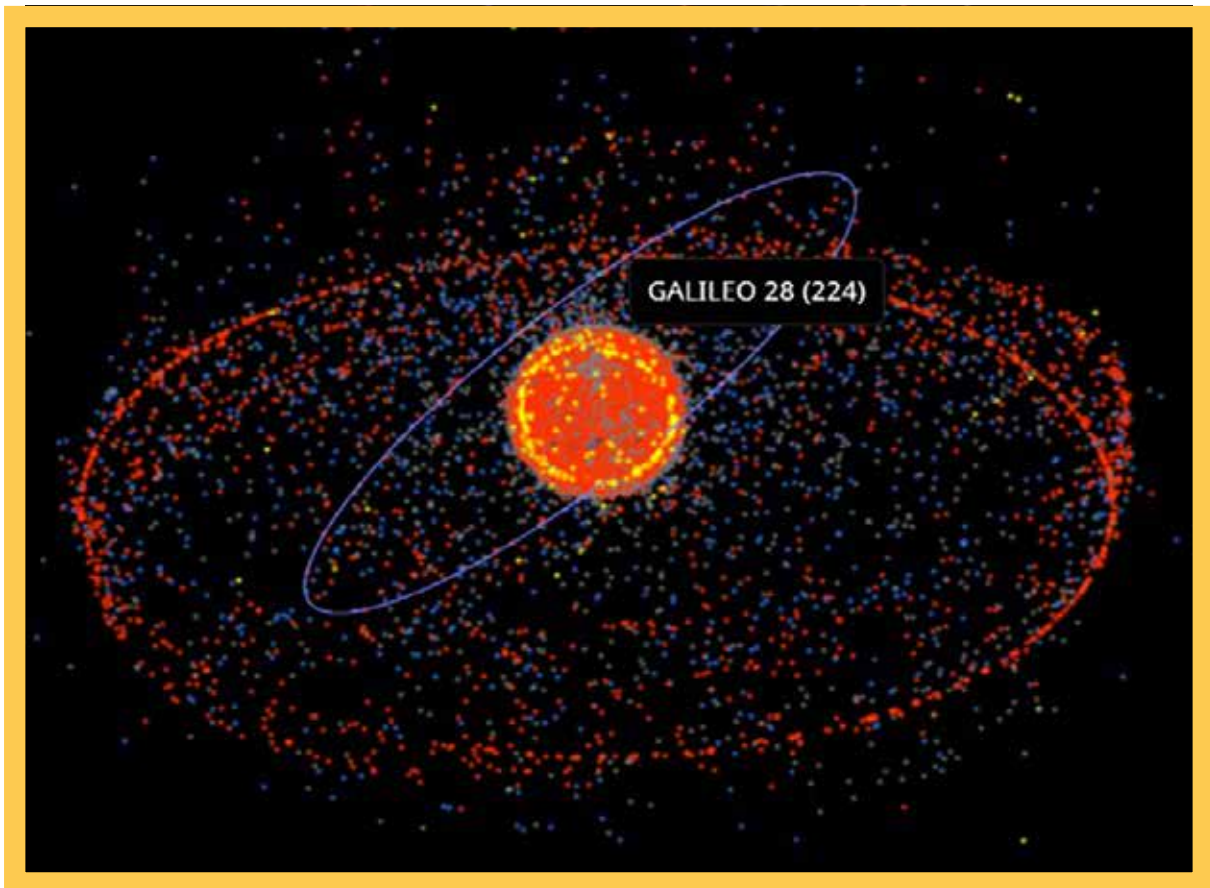


Fig. 02 Visualisation dynamique des milliers de satellites (Sources : [www.sky.rogue.space](http://www.sky.rogue.space))

#### **Orbite Terrestre Moyenne (MEO - Medium Earth Orbit)**

- Altitude : 2 000 à 35 786 km.
- Caractéristiques : utilisée principalement pour les satellites de navigation comme le GPS.

#### **Orbite Géostationnaire (GEO - Geostationary Orbit)**

- Altitude : environ 35 786 km.
- Caractéristiques : les satellites en GEO sont considérés stationnaires par rapport à un point sur la Terre, ce qui les rend adaptés pour les communications et les surveillances météorologiques et terrestres.

#### **Orbite Héliosynchrone (SSO : Sun Synchronous Orbit)**

- Altitude : variable, souvent dans la gamme LEO.
- Caractéristiques : ces orbites permettent au satellite de passer au-dessus d'une région de la Terre à la même heure solaire chaque jour. Ce type d'orbite est choisi pour les satellites effectuant des observations photographiques car l'éclairage solaire des lieux observés est pratiquement constant d'un cliché à l'autre ce qui permet de faciliter la détection de changements intervenus entre deux survols.

## 05. Les satellites d'observation de la Terre

Les satellites de type « observation de la Terre » sont conçus pour surveiller et étudier la surface terrestre et maritime ainsi que certaines données météorologiques comme les couvertures nuageuses. Également connus sous le nom de satellites de télédétection, ils sont pour la plupart placés sur une orbite terrestre basse (LEO - *Low Earth Orbit*) afin d'obtenir des données de haute résolution. Cependant, certains sont positionnés en orbite géostationnaire pour une couverture en continu d'une zone terrestre. D'autres satellites sont positionnés sur une orbite héliosynchrone pour bénéficier d'un angle d'éclairage solaire constant et réaliser une vue d'ensemble cohérente de la Terre. En fonction de leurs missions spécifiques, les satellites peuvent être équipés de divers capteurs, tels que des caméras optiques, des radars, des photomètres ou des instruments atmosphériques.

Ce sont ces types de satellites qui sont utilisés en grande partie pour l'observation et le traitement relatif aux infrastructures et environnants des réseaux d'énergie électrique.

Dans le domaine des satellites d'observation, les nombreuses avancées technologiques des dix dernières années ont permis d'obtenir des données satellitaires en très haute résolution (jusqu'à 0,3 mètres), des taux de revisite élevés avec plusieurs passages sur une même zone par jour, et une grande variété de types d'images, en bandes infra-rouges, multispectrales, hyper-spectrales ainsi que des imageries radar SAR pour des représentations après traitements en 2D et 3D.

## 06. Les principales constellations de satellites d'observation

**SENTINEL** constitue un ensemble de satellites du programme européen Copernicus :

- **Sentinel 1** : Satellites équipés de Radar (SAR) délivrant des images radar tous temps.
- **Sentinel 2** : Satellite à Image optique, multispectrale de haute résolution (10 mètres)
- **Sentinel 3** : Satellite à Image optique multispectrale de moyenne résolution et Radar SAR

**MAXAR** fournit un ensemble de satellites WorldView de très haute définition :

- **WorldView-3**, l'un des satellites opérationnels les plus avancés de Maxar, peut fournir des images avec une résolution allant **jusqu'à 30 centimètres** pour l'imagerie panchromatique (noir et blanc) et environ **1,2 mètres** pour l'imagerie **multispectrale** (couleur) incluant 8 bandes distinctes, dont le visible et le proche infrarouge (VNIR)



**Fig. 03** Les principaux satellites d'observation

pour l'évaluation de la couverture et du type de végétation. WorldView-3 dispose également des analyses **super-spectrales** avec 8 bandes supplémentaires dans le court infrarouge (SWIR) pour des applications comme la classification de matériaux et la détection d'incendies.

- **GeoEye**, fournit des images en très haute résolution de 40 centimètres en panchromatique et 1,65 mètre en multispectral.

**AIRBUS DS**, division d'Airbus et acteur majeur de l'aérospatiale offre une gamme de constellations de satellites pour diverses applications, dont les principales sont :

- **Pléiades** : constellation constituée de satellites d'observation de très haute résolution, fournit des images détaillées pour la cartographie, l'urbanisme, et la gestion des catastrophes naturelles, avec une résolution d'environ 0,5 mètre.
- **SPOT** : la série de satellites SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre), offre des images d'une résolution allant de 2,5 à 10 mètres, utiles pour l'agriculture, la gestion des forêts et la surveillance environnementale, permettant une couverture étendue et régulière de la Terre.
- **TerraSAR-X et TanDEM-X** : les satellites de technologie radars SAR, fournissent des données indépendamment des conditions météorologiques et de l'éclairage pour des images précises de topographie, de cartographie 3D et d'analyse des variations fines de hauteur de terrain.

## 07. Les résolutions et types de données satellitaires

Il existe trois caractéristiques principales pour définir les données satellitaires : les résolutions temporelles, spatiales et spectrales.

**La résolution temporelle** fait référence au temps nécessaire à un satellite pour orbiter et revisiter une même zone spécifique, ce qui détermine la fréquence des données capturées (appelée également temps de revisite). Cette fréquence peut être quotidienne, hebdomadaire ou mensuelle.

**La résolution spatiale** fait référence au niveau de détail capturé. Elle se mesure en mètre, une résolution de 0,30 mètre correspond à un carré ou pixel de 0,30 mètre de côté. Une comparaison de quelques résolutions d'images optiques est présentée ci-dessous.



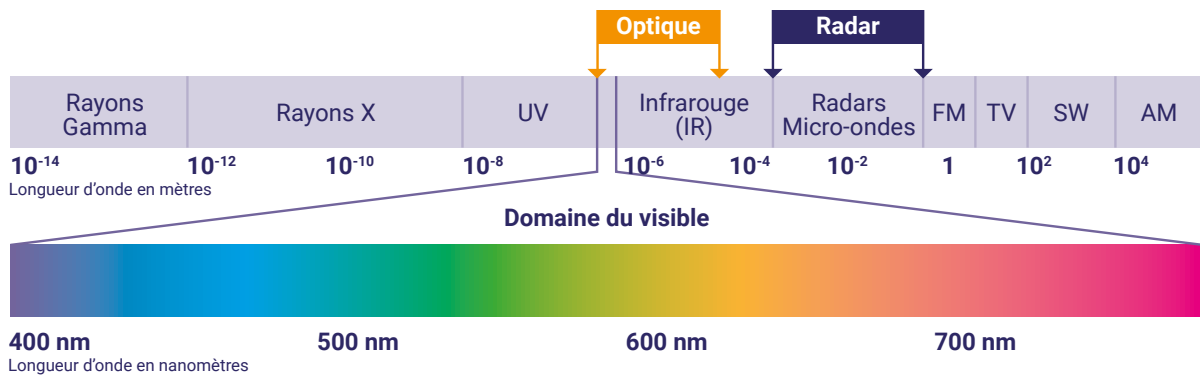
Fig. 04 Exemples de résolution (Source : Radiant Earth Foundation)



Les résolutions natives des images issues des capteurs peuvent être augmentées grâce à des techniques de traitement sur plusieurs images et types de bande de fréquence, comme le *pan-sharpening*. Cette technique permet d'augmenter la résolution des images en couleur en les superposant aux images panchromatiques.

**La résolution spectrale** fait référence aux longueurs d'onde ou à la plage du spectre électromagnétique captées par les capteurs embarqués sur les satellites. Ces différents capteurs permettent :

- La mesure optique visible (photographique),
- L'analyse multispectrale optique avec des groupes de bandes proches (UV, IR) ou hyper-spectrale avec plusieurs centaines de bandes en continuité,
- L'utilisation du spectre des micro-ondes pour les radars de type SAR (Synthetic Aperture Radar ou Radar à Synthèse d'Ouverture).



**Fig. 05** Bandes de longueurs d'ondes

Les types d'applications principales en fonctions des bandes de longueur d'onde sont résumés dans le tableau page suivante.

## Les nuages et l'observation optique

Une limite importante de l'observation optique est celle du manque de visibilité en présence de nuages, fortement dépendante des latitudes et des périodes de l'année. Certaines régions, comme les zones équatoriales peuvent être très souvent sous couverture nuageuse, rendant les observations imprévisibles et difficiles. Des études comme celle de la NASA ont montré que 67 % de la surface totale de la Terre est généralement couverte de nuages et qu'en moyenne 30 % des zones au-dessus des terres étaient sans nuages simultanément.

Bande de fréquence	Longueur d'onde	Type d'application	Exemples d'utilisation
Ultraviolet (UV)	10 nm - 400 nm	Surveillance de la couche d'ozone et atmosphérique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suivi de la dégradation de la couche d'ozone et détection de polluants atmosphériques.</li> <li>• Analyse des gaz atmosphériques et études des aérosols.</li> </ul>
Visible (VIS)	400 nm - 700 nm	Imagerie terrestre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartographie détaillée, surveillance de l'occupation des sols et suivi des infrastructures.</li> <li>• Gestion de l'urbanisation et suivi de la croissance des villes.</li> </ul>
Infrarouge proche (NIR)	700 nm - 1 µm	Agriculture de précision - Gestion de la végétation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surveillance de la santé des cultures, gestion de l'irrigation, détection de maladies.</li> <li>• Évaluation de la biomasse, suivi des écosystèmes forestiers.</li> </ul>
Infrarouge moyen (MIR)	1 µm - 15 µm	Analyses thermiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localisation et suivi des incendies.</li> <li>• Analyse de la chaleur urbaine, détection de fuites thermiques.</li> </ul>
Infrarouge lointain (FIR)	15 µm - 1 mm	Analyse climatique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Étude de la température de surface, surveillance des changements climatiques.</li> <li>• Observation des précipitations.</li> </ul>
Micro-ondes (Radar SAR)	1 mm - 1 m	Topographie et détection des reliefs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartographie des reliefs, étude des glissements de terrain.</li> <li>• Suivi des inondations, surveillance des tremblements de terre.</li> <li>• Détection des infrastructures.</li> </ul>
Hyperfréquence (Radio)	> 1 m	Télécommunications	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmission de données</li> </ul>



Les images que l'on connaît le plus souvent, nettes de nuages, sont pour la plupart réalisées grâce à la technique de prise de photos multiples appelée « composition temporelle ». Cette méthode nécessite la collecte de plusieurs clichés d'un même endroit sur Terre à différents moments, puis la sélection des parties sans nuages pour créer une seule image composite claire. En contrepartie, cela ralentit la fréquence des mises à jour de l'image disponible une fois traitée et limite les capacités de détection d'incidents.

## 08. Les données SAR et la technique InSAR

Le radar à synthèse d'ouverture (en anglais SAR – Synthetic Aperture Radar) et l'interférométrie par radar à synthèse d'ouverture (InSAR- Interferometric Synthetic Aperture Radar) sont basés sur des technologies de télédétection avancées qui utilisent les propriétés des ondes radar pour obtenir des informations détaillées du relief de la surface de la Terre. Bien que ces technologies partagent des données SAR similaires, elles sont utilisées pour des applications légèrement différentes en raison de leurs caractéristiques uniques. L'avantage de cette technologie radar est que les images sont peu sensibles à la couverture nuageuse, ce qui n'est pas le cas de l'imagerie optique et multispectrale.

### Radar à synthèse d'ouverture (SAR)

- **Émission d'ondes radar** : SAR fonctionne en émettant des ondes radar depuis un satellite ou un avion vers la surface de la Terre. Ces ondes traversent les nuages et peuvent être émises de jour comme de nuit, offrant une grande flexibilité dans la collecte de données.
- **Réception des échos** : le système SAR reçoit ensuite les échos de ces ondes radar après leur réflexion sur la surface terrestre. La durée entre l'émission de l'onde et la réception de l'écho permet de déterminer la distance entre le satellite et la surface de la Terre.
- **Création d'images** : en utilisant les différences de temps (phase) des signaux reçus, le SAR peut créer une image détaillée du relief de la surface. La «synthèse d'ouverture» réfère à la capacité de simuler une très grande antenne radar (ou ouverture) en mouvement, permettant de générer des images à haute résolution.

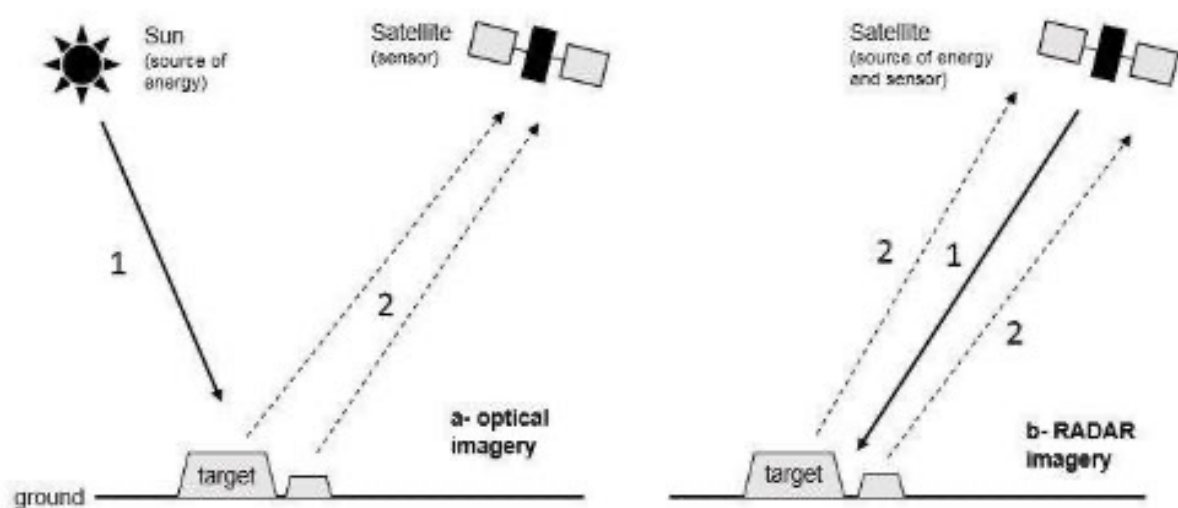
### Interférométrie par radar à synthèse d'ouverture (InSAR)

- **Acquisition d'images multiples** : la technique InSAR utilise les données SAR en comparant deux ou plusieurs images SAR prises par le satellite dans la même zone mais à des dates différentes.

- **Analyse de la différence de phase** : en analysant la différence de phase entre ces images, la technique InSAR permet de détecter des déplacements de la surface de la Terre avec une précision de l'ordre du centimètre voire même du millimètre.
- **Création de cartes de déformation** : les données de phase sont ensuite utilisées pour créer des cartes d'interférence qui illustrent les déformations des surfaces terrestres survenues entre les prises de vue. Ces dernières sont causées par des séismes, des glissements de terrain, des éruptions volcaniques; ou encore des changements dans les structures artificielles.

**La technologie SAR** est utilisée pour une large gamme d'applications, y compris la cartographie, la topographie, la surveillance des changements environnementaux, l'agriculture, et la surveillance des glaces et des océans.

**Fig. 06** Image Optique/multispectrale/hyper-spectrale et Image Radar (SAR)



**La technique InSAR** est particulièrement utile pour la surveillance des déformations du sol, la gestion des risques naturels, la surveillance des infrastructures, et l'étude des processus géologiques. **Dans le domaine de l'énergie**, elle est applicable pour la surveillance des sols autour des infrastructures électriques et permet :

- La détection des affaissements et des glissements de terrain pouvant affecter les fondations des infrastructures ;
- La mesure de la hauteur des différentes couches de canopée de la végétation.

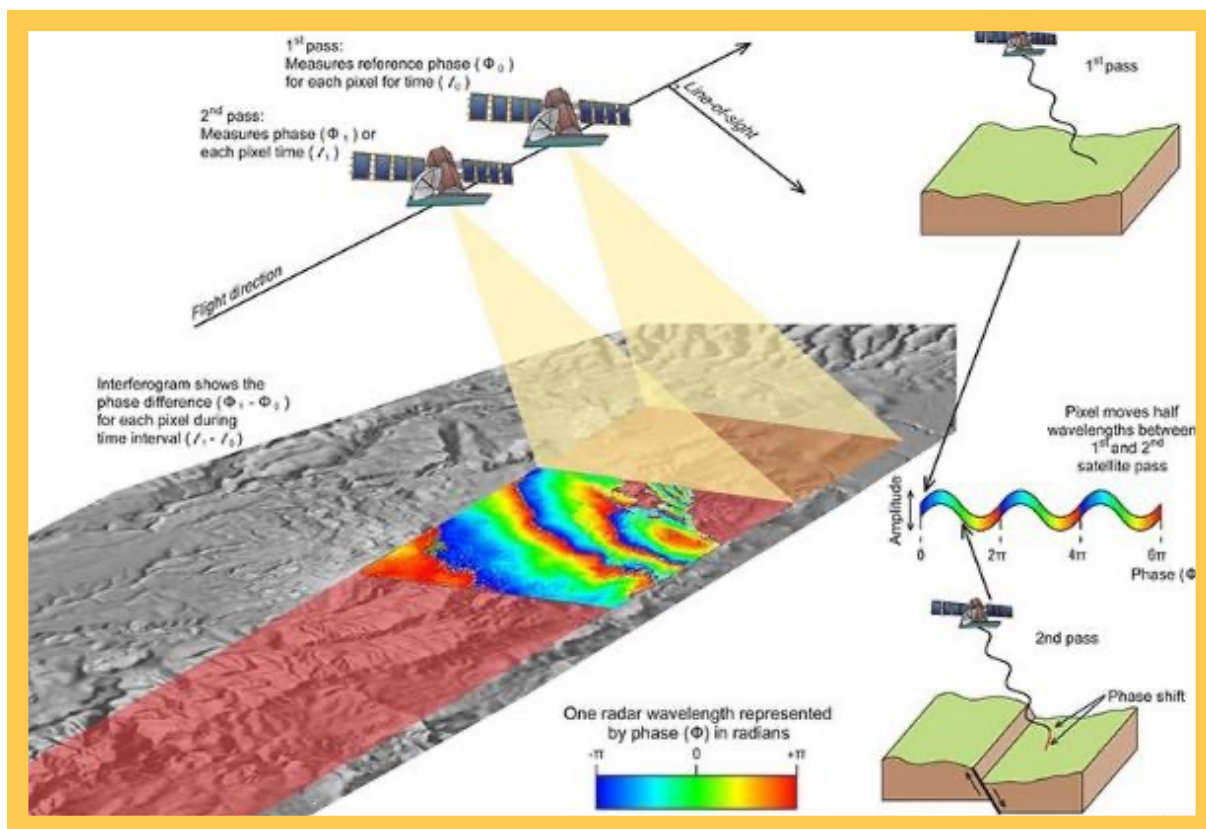


Fig. 07 Technique InSAR

## 09. Disponibilité des données

De nombreux satellites ont été lancés dans le cadre de programmes gouvernementaux, au service de communautés élargies et leurs données sont mises à la disposition du public, des chercheurs et des sociétés commerciales. Il s'agit notamment des satellites exploités par la NASA (Landsat) et l'Agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre des programmes COPERNICUS. Ces données sont accessibles via des plateformes telles que PEPS (CNES), Theia ou DIAS.

D'autres satellites appartiennent à des sociétés commerciales qui vendent alors l'accès à ces données. Il s'agit d'entreprises telles que Maxar (anciennement DigitalGlobe), Airbus DS, Planet, ICEYE, etc. De plus, il est possible d'exploiter les archives de données issues des nombreux satellites publics d'observation de la Terre lancés il y a plusieurs décennies. Cela permet notamment d'analyser les évolutions de la couverture terrestre ainsi que celles des infrastructures humaines.

Cette multitude de technologies et de programmes satellitaires a pour effet de diminuer le coût moyen des images ainsi que de rendre disponibles des données sur des plateformes (en open data ou commerciale). Par ailleurs, le nombre d'acteurs, et notamment d'entreprises et de start-ups, visant à offrir des services spécifiques et avancés d'analyse des images est en croissance.

Le tableau ci-après présente un résumé des types de données et de résolutions ainsi que les applications dans le domaine de l'énergie pour une sélection de satellites. Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle illustre la diversité des satellites, des capteurs, et des applications possibles dans le secteur de l'énergie.

Catégorie de Satellite	Programme Satellite	Type d'Image	Résolution	Revisite	Exemples Applications dans l'Énergie
Observation de la Terre	Landsat 8	Optique Multispectrale/Thermique	15m - 100m	16 jours	Cartographie des ressources solaires et éoliennes, surveillance des grandes infrastructures
Observation de la Terre	WorldView-3	Optique Haute Résolution Multispectrale	Jusqu'à 0,3m	1-2 jours	Surveillance détaillée des infrastructures, urbanisation, surveillance de la végétation près des lignes électriques.
Observation de la Terre	Sentinel-1	Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR)	5m - 25m	6 jours	Imagerie tout temps. Suivi des changements et mouvements de terrain, évaluation des risques d'impact autour des infrastructures, inondations.
Observation de la Terre	Sentinel-2	Optique Haute Résolution Multispectrale	10m	5 jours	Surveillance détaillée des infrastructures, urbanisation, surveillance de la végétation près des lignes électriques.
Météorologie	GOES-16	Optique Multispectrale	500m	Continu	Prévisions météorologiques, analyse des impacts climatiques sur la production énergétique.
Navigation et Position	GPS (USA), Galileo (EU)	N/A	N/A	Continu	Optimisation des routes de maintenance, suivi des actifs énergétiques.
Environnement et Climat	Sentinel-3	Multispectrale/Thermique	300m	1-2 jours	Surveillance de l'environnement, évaluation de l'impact environnemental des projets énergétiques.
Observation de la Terre	Pléiades 1A & 1B	Optique haute résolution	0,5m	Chaque jour (avec les deux satellites)	Cartographie de précision pour la planification des infrastructures, suivi des constructions, gestion des risques naturels.
Observation de la Terre	Pleiades Neo	Optique haute résolution/ Multispectrale	0,3 m	2 fois par jour	Surveillance détaillée et temporelle des infrastructures, urbanisation, végétation près des lignes électriques, suivi incident et impacts.

## 10. Coûts des images satellitaires

Les coûts associés à l'acquisition de données géosatellitaires peuvent varier considérablement en fonction des paramètres suivants :

- **La résolution spatiale** : les images à plus haute résolution sont généralement plus coûteuses en raison de la valeur ajoutée qu'elles apportent en termes de détails et de précision.
- **La fréquence de revisite** : l'obtention d'images d'une même zone à des intervalles réguliers ou sur demande peut augmenter les coûts.
- **La personnalisation** : les services de commande d'images spécifiques à une zone et à un moment précis (acquisitions à la demande) peuvent entraîner des coûts supplémentaires.
- **Le traitement et l'analyse des données** : les coûts peuvent également inclure le traitement des images pour les rendre utilisables, comme la correction géométrique, la correction radiométrique, et l'analyse des données.

On donne ci-dessous un aperçu général des ordres de grandeur pour les coûts des données satellitaires (pour la période 2022-2023) :

- **Images à haute résolution** : les images satellites à haute résolution (inférieures à 1 mètre par pixel) sont parmi les plus coûteuses, avec des prix pouvant aller **de quelques euros à plus de 25 euros** par kilomètre carré si elles sont récentes et de haute qualité. Des fournisseurs comme Airbus DS avec les satellites Pleiades, Maxar avec les satellites Worldview et GeoEye proposent de telles images.
- **Images à résolution moyenne** : les images à résolution moyenne (entre 1 et 10 mètres par pixel) sont généralement moins coûteuses, avec des coûts variant **de quelques centimes à quelques dollars** par kilomètre carré. L'Agence Spatiale Européenne (ESA) dans le cadre du programme Copernicus ou la NASA avec le programme Landsat offrent un accès gratuit à des images à résolution moyenne.
- **Abonnements et licences** : pour les entreprises et les institutions nécessitant un accès continu à des données satellitaires, les fournisseurs proposent souvent des abonnements ou des licences annuelles. Ces arrangements peuvent coûter **de quelques milliers à plusieurs millions de dollars** par an, en fonction de l'étendue et de la fréquence des données requises.

- **Données gratuites et open source** : il existe plusieurs sources de données satellitaires gratuites telles que les programmes Landsat de la NASA et Sentinel de ESA (accès via le site [Copernicus](#)) qui fournissent des images à résolution moyenne et haute couvrant l'ensemble du globe. Bien que gratuite, l'utilisation de ces données peut nécessiter des ressources supplémentaires pour le traitement et l'analyse.



# Différents cas d'usage pour la gestion **des réseaux électriques**

## 01. Préambule

L'étude des thèmes sélectionnés en phase cadrage a permis d'identifier de nombreux cas d'usage pertinents. Ces cas d'usage seront présentés et détaillés dans les chapitres suivants. Ils illustrent concrètement comment les données satellitaires peuvent être exploitées pour améliorer la gestion des réseaux. Ils couvrent ainsi les 3 thématiques suivantes :

- L'accès à l'énergie, planification et déploiement des réseaux,
- La gestion des environnants des infrastructures réseaux et des événements climatiques,
- La gestion des infrastructures et la maintenance prédictive.

Ces thématiques ont révélé de nombreuses intersections fonctionnelles et suggèrent une approche intégrée pour l'étude. Un exemple notable de cette transversalité est la «gestion de la végétation», un sujet d'importance souligné par les compagnies d'électricité. La gestion de la végétation intervient dans les phases de planification des réseaux, de maintenance et de gestion des risques naturels.

## 02. Planification et déploiement des réseaux – l'accès à l'énergie

Cette section examine l'utilisation des technologies satellitaires dans les programmes d'accès à l'énergie et dans la planification des réseaux électriques. Elle se concentre notamment sur les cas d'usage relatifs à l'identification des zones à électrifier. Il s'agit de construire les scénarios optimaux notamment en arbitrant entre l'extension du réseau existant et la mise en place de solutions autonomes, telles que les micro-réseaux et les systèmes photovoltaïques. Cette optimisation prend en compte les bénéfices attendus de l'électrification en termes de développement social et économique des zones cibles. Les données satellitaires fournissent des informations éclairant la topographie, les différents niveaux d'occupation du terrain, la nature du sol, les couverts végétaux, les bâtis, les densités urbaines, les infrastructures existantes, les risques naturels et météorologiques.

Combinées avec des données démographiques et économiques, elles facilitent l'exploration des différents scénarios de déploiement. Cela oriente le choix des solutions optimales en fonction d'objectifs d'accès à l'énergie, d'activité, de maîtrise des coûts de construction et d'exploitation, d'efficacité, de fiabilité et de résilience du réseau.



Les gouvernements, les développeurs privés ou publics de projets, les opérateurs de réseaux et de centrales de production ont besoin de ces données afin de mener efficacement leurs activités.

## 2.1 Accès à l'énergie : planification des zones à électrifier

L'identification des zones à électrifier constitue une première étape dans la planification des réseaux électriques. Les images satellitaires en moyenne et haute résolution permettent, d'une part de cartographier avec précision les zones habitées non desservies par le réseau électrique, et d'autre part d'analyser les zones propices au déploiement des unités de production d'énergie renouvelable.

En effet, de nombreux projets s'appuient sur les images satellites dans les phases de pré-étude. Ces évaluations préliminaires peuvent porter sur des zones déjà desservies par le réseau ou sur des zones à électrifier, (soit par raccordement au réseau, soit par déploiement de mini-réseaux isolés). Par exemple, le projet «**Global Electrification Platform**» utilise ces technologies pour estimer les coûts et les modalités d'électrification à travers le monde, en intégrant les données sur les populations, les infrastructures existantes et les ressources énergétiques disponibles (voir l'aperçu des programmes p. 36).

Ces évaluations préliminaires de zones sont également possibles avec des images satellitaires open source de moyenne résolution. La comparaison d'images d'une même zone à différentes dates, permet de caractériser la vitesse d'expansion urbaine ou rurale grâce aux historiques de données. Par ailleurs, la présence humaine et a fortiori les zones d'activités électrifiées peuvent être détectées et évaluées grâce aux imageries d'intensité lumineuse nocturne (NTLI).

En outre, l'utilisation des données satellitaires est particulièrement pertinente pour les régions difficiles d'accès, comme les villages clairsemés et en zones reculées. Dans ces dernières, les données de terrain sont limitées ou obsolètes et obligent à des campagnes de visite sur site, potentiellement longues et coûteuses.

Ces données permettent ensuite de construire les différentes stratégies d'accès à l'énergie que nous pouvons résumer comme suit :

- La connexion directe des nouveaux clients au réseau électrique existant. Cette approche est souvent la plus économique, là où le réseau est déjà proche et sous-utilisé. Elle inclut le renforcement des infrastructures et l'intégration de sources d'énergie renouvelable.
- L'extension du réseau électrique vers des zones non desservies se réalise par la

construction de nouvelles lignes de transmission et de distribution, ou par hybridation avec des systèmes locaux de production d'énergie renouvelable, réduisant ainsi la dépendance aux centrales éloignées et aux lignes haute tension.

- La mise en œuvre de mini-réseaux (minigrids) ou unités de production électrique autonomes tels que panneaux solaires, petites éoliennes et centrales biogaz.

La combinaison judicieuse de ces différentes approches rend possible l'objectif d'un accès universel à une énergie propre et abordable.

## **2.2 Planification et déploiement des réseaux électriques**

Une fois les stratégies d'électrification définies, les données satellitaires continuent de fournir des informations utiles à différentes étapes de la planification des réseaux. C'est le cas par exemple de l'imagerie optique multispectrale et radar SAR, ou des données météorologiques et d'ensoleillement. Ces informations offrent une vue d'ensemble précise de la zone à travers de nombreuses caractéristiques : topographie, occupation et nature du sol, niveaux d'utilisation du terrain, couvertures végétales, bâtiments, infrastructures existantes, risques naturels et météorologiques.

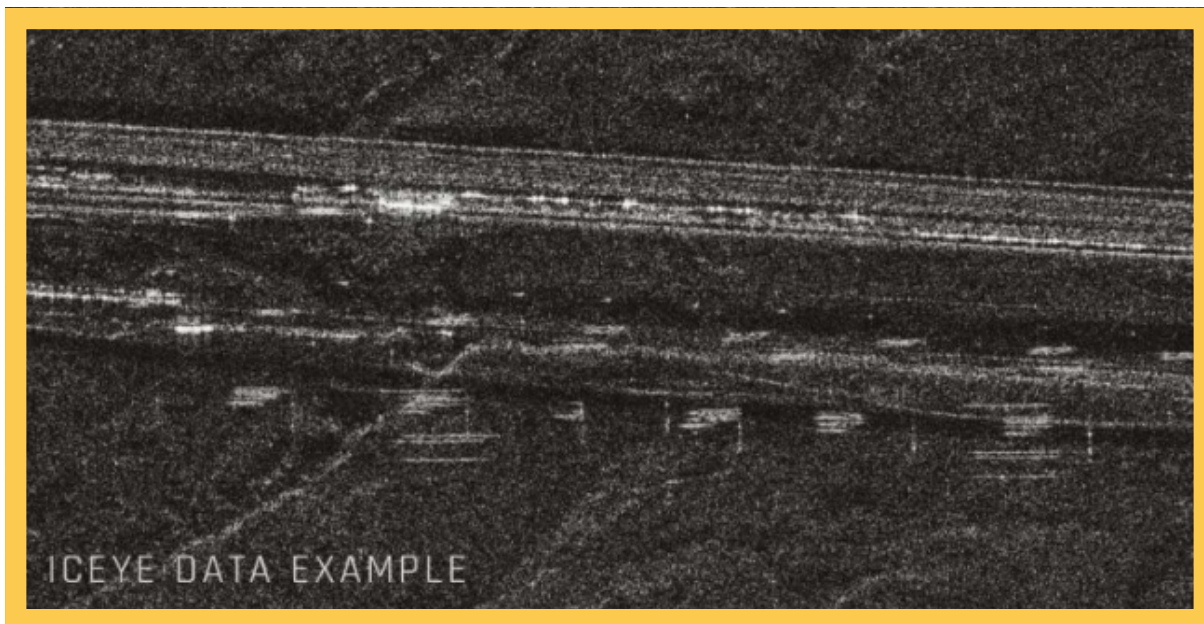
### **L'aide au géoréférencement et à la cartographie**

Les images satellites facilitent le géoréférencement des infrastructures existantes. Elles sont souvent complétées par des données terrestres ou aériennes (photographies et LiDAR avec reconnaissance automatiques d'infrastructures et d'éléments). Elles permettent :

- D'enrichir les bases de données existantes, le plus souvent disponibles dans un SIG (ESRI /ArcGIS, SmallWorld, OpenGIS, pour les plus courants) pour réaliser des cartographies géospatiales avec l'emplacement des lignes, pylônes, postes, équipements et bâtis existants.
- De créer ou compléter les bases de données obsolètes et de trop mauvaise qualité.

Ces cas se rencontrent fréquemment car il est souvent difficile de maintenir les bases de données d'actifs, contenant leurs caractéristiques et les informations sur leur état.

En fonction des infrastructures, les données satellites seront recoupées avec des informations de terrain ou aériennes lorsque les niveaux de précision ne pourront être atteints avec les seules images satellites. C'est le cas notamment pour les petites tailles d'infrastructures (inférieures à 1 à 10 mètres en fonction de la résolution) comme les lignes, les pylônes et équipements MT/BT, et les petites centrales solaire ou éoliennes qui restent encore difficiles à détecter correctement depuis l'espace.



**Fig. 08** Exemple de détection de lignes et de pylônes avec système SAR.

### **L'identification de lignes et de pylônes**

Les lignes de moyenne tension (typiquement entre 11kV et 60kV) peuvent être insuffisamment répertoriées dans certaines régions. La valeur ajoutée de l'analyse des données satellitaires réside alors dans l'amélioration de la connaissance du réseau grâce à leur large couverture géographique. Celle-ci est particulièrement utile dans les zones où les infrastructures sont clairsemées. Elle permet également la prise en compte de grands volumes d'actifs comme les pylônes ou les sections de lignes.

Cependant, ces lignes et ces équipements moyenne tension demeurent encore peu visibles, voire invisibles, à l'observation satellitaire. Encore davantage que pour les infrastructures HT et THT, les recours aux inspections terrestres (Caméra ou LiDAR embarqué sur véhicule), et aux photos aériennes par drone, hélicoptère ou avion, restent pour le moment les seules alternatives apportant les niveaux de précision nécessaire, et ce, malgré un coût et des temps de mise en œuvre significatifs.

Pour ce qui est des lignes hautes tensions, les câbles électriques qui relient les poteaux ou les pylônes peuvent être trop fins pour être détectés de manière robuste par les capteurs optiques des satellites, même en haute résolution. Cependant, les pylônes peuvent être plus ou moins visibles à l'observation selon leur envergure. Les pylônes de lignes HT, 225 kV seront par exemple plus observables que des pylônes 90kV qui sont aujourd'hui à la limite de l'observabilité en lecture brute des images optiques. Par ailleurs, des moyens supplémentaires peuvent être mis en œuvre : la détection de « corridors végétaux » pour repérer les lignes qui y sont inscrites ou encore l'utilisation de données Radar SAR, comme figuré ci-dessus (fig 08 : Ceye Data Example).

## La modélisation des réseaux

Les données satellitaires contribuent à la modélisation des réseaux en fournissant des informations essentielles sur la topographie (montagnes, pentes, obstacles, etc.) et l'environnement. Elles facilitent le choix des tracés pour les lignes électriques et la localisation des infrastructures de réseau, comme les postes électriques, les pylônes et les sites de production d'énergie, centralisés ou décentralisés.

Par exemple, elles permettent l'analyse des tracés les plus courts et les moins coûteux pour les lignes de transmission et de distribution, ou les tracés les moins exposés aux risques naturels. Par ailleurs, les données météorologiques seront aussi utiles pour alimenter des applications de calculs de réseau et de modélisation pour dimensionner de manière optimale les capacités des infrastructures et des lignes et pour simuler le comportement du réseau sous différentes conditions.

## L'évaluation des zones de déploiement des ENR et leur intégration

En analysant les radiations solaires, les profils de vents et autres facteurs environnementaux, les développeurs peuvent identifier les sites les plus prometteurs pour l'installation de centrales photovoltaïques ou éoliennes. Ces dernières peuvent se déployer de manière centralisée ou dispersée, avec des conditions variables d'une zone à l'autre. L'intégration des énergies renouvelables pose quant à elle de nouveaux défis pour la gestion des réseaux électriques, notamment en termes de variabilité de la production d'électricité, de stabilité du réseau et d'équilibre offre-demande.

Les satellites apportent des outils supplémentaires aux opérateurs en fournissant des données en temps réel sur les conditions météorologiques qui affectent la production d'énergie solaire et éolienne, ainsi que des informations sur les niveaux de hauteur de barrage (comme par exemple la mesure de l'empreinte du lac ou de la hauteur du lac d'un barrage avec les données SAR).

L'analyse de ces données permet de prévoir les fluctuations de production et d'ajuster la distribution d'énergie en conséquence, afin d'assurer une alimentation énergétique fiable. Elle est intégrée dans les systèmes de gestion de l'énergie de type EMS des centres de contrôle des réseaux.

## 2.3 Aperçu de projets et de programmes d'accès à l'énergie en Afrique

Environ **600 millions de personnes en Afrique** n'ont toujours pas accès à l'électricité. Malgré les progrès récents, les efforts d'électrification sont confrontés à des défis majeurs en matière d'accessibilité financière. Les progrès réalisés en matière de solutions

« hors réseau », en particulier les technologies basées sur l'énergie solaire et les batteries, ou l'apparition de nouveaux modèles commerciaux, viennent compléter la fourniture d'accès par extension et par connexion aux réseaux. L'AIE (Agence internationale de l'énergie) indique que les systèmes hors réseau **ont représenté plus de la moitié des nouvelles connexions en 2022** en Afrique subsaharienne.

Plusieurs programmes et projets financés au niveau africain et mondial sont mis en œuvre afin de promouvoir l'accès universel à l'énergie. Ces projets intègrent la mise à disposition d'outils et de bases de données, notamment satellitaires. Quelques projets et outils sont présentés dans cette section.

Le programme « Data-Driven Electrification in Africa » de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et de Power Africa vise à accélérer l'accès à l'énergie sur le continent. Cette initiative a donné naissance à deux outils numériques, cités ci-dessous, qui renforcent la capacité des planificateurs énergétiques à prendre des décisions fondées sur des données.

- **« GIS Catalogue for Energy Planning in Africa »**

Il s'agit d'un référentiel centralisé de données SIG et d'outils pour les planificateurs énergétiques. L'AIE a collecté des modèles géospatiaux et des ensembles de données pour les acteurs du secteur énergétique. Cette plateforme compile des ensembles de données géoréférencées détaillant la répartition des populations, les ressources en énergies renouvelables, les infrastructures du système énergétique, les principaux centres de demande, ainsi que des ensembles de données non géospatiales sur les taux de croissance de la population, les indicateurs réglementaires, la performance des services publics et les caractéristiques du marché de l'électricité à travers le continent.

► *Retrouvez les outils et contenus **proposés par l'AIE***

- **« Building-level Electricity Needs Estimation Model »**

Basé sur des modèles intégrés au sein de **Open Energy Maps**, un outil SIG open-source développé en collaboration avec le MIT Energy Initiative, ce modèle est conçu pour estimer et prévoir la demande en électricité au niveau des bâtiments dans les pays en développement. Cet outil utilise un modèle d'apprentissage automatique entraîné sur des données géoréférencées de consommation d'électricité provenant des compteurs dans trois pays pilotes : le Ghana, le Sénégal et l'Ouganda. Il permet de prédire la demande en électricité pour les bâtiments qui ne disposent pas de données de compteurs ou qui ne sont pas encore électrifiés avec une haute résolution et une grande précision.



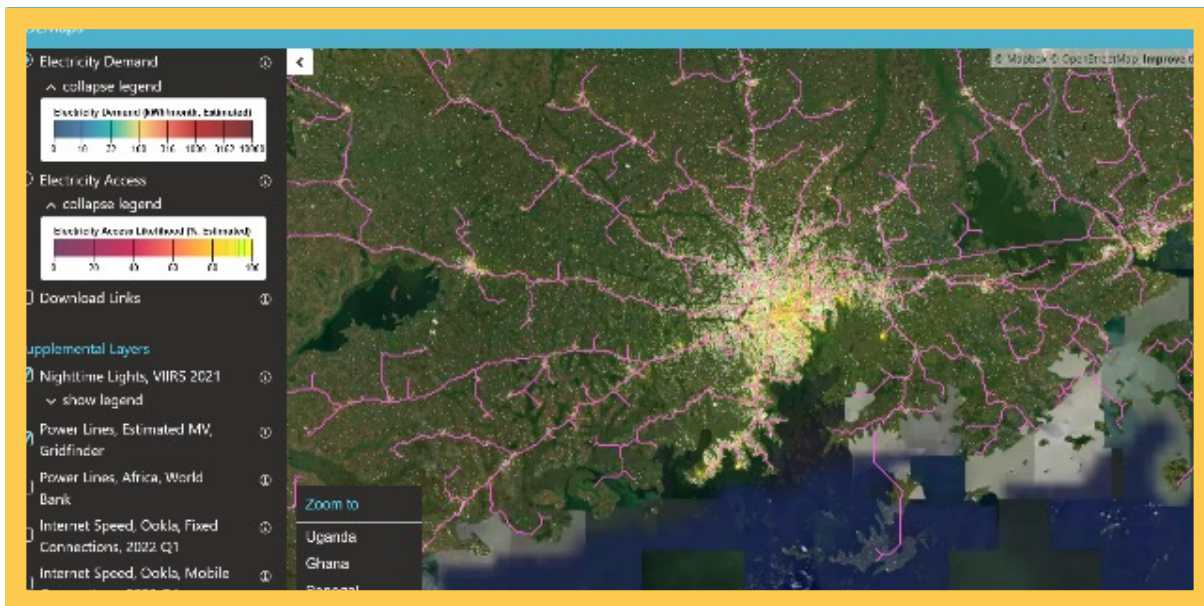


Fig. 09 Uganda : éclairage nocturne avec ajout de la cartographie du réseau moyenne tension

La plateforme **Open Energy Maps** a pour objectif de promouvoir la transparence et l'accessibilité des données sur les énergies renouvelables. Parmi ses caractéristiques principales, on retrouve des outils de cartographie interactifs qui permettent aux utilisateurs de visualiser des données sur l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique et d'autres formes d'énergies renouvelables.

Ces outils sont conçus pour être utilisés par tous types d'acteurs, y compris des chercheurs académiques, des développeurs de projets énergétiques, des décideurs politiques et par le grand public.

► Retrouvez d'autres projets sur la [plateforme OEMaps](#)

## Les programmes de l'IRENA (International Renewable Energy Agency)

L'IRENA met à disposition la plateforme d'électrification (IEP) pour l'Afrique de l'Ouest en ligne et libre d'accès. Elle permet d'avoir un aperçu des scénarios d'investissement en matière d'électrification en Afrique de l'Ouest.

La plateforme montre quelle combinaison de technologies (connexion au réseau centralisé, différents types de mini-réseaux ou de systèmes photovoltaïques autonomes) peut fournir de l'électricité au coût le plus bas en fonction du scénario.

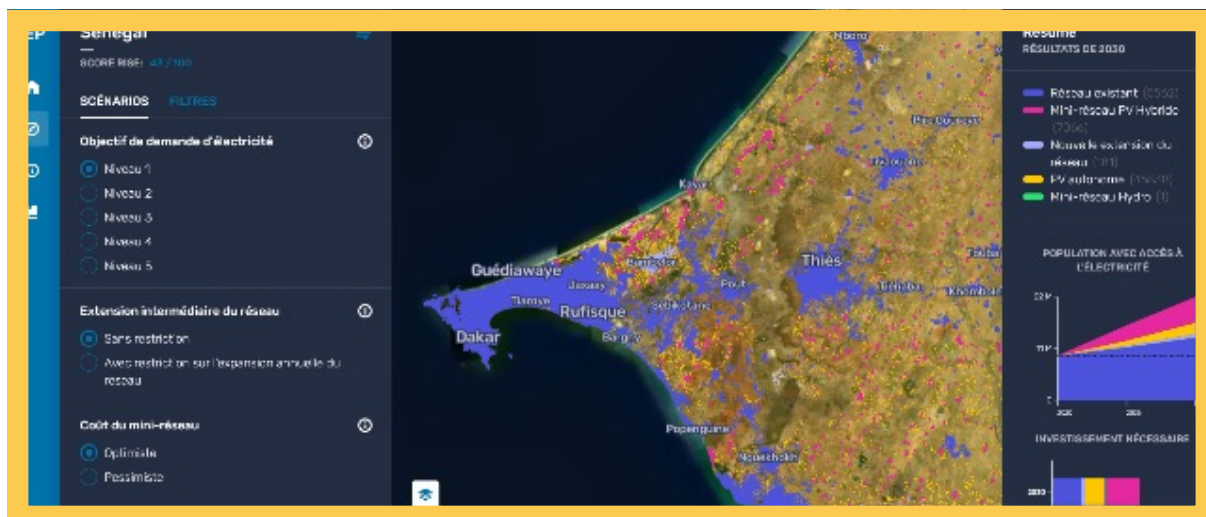


Fig. 10 Sénégal Exemple analyse de scénario d'accès à l'énergie

En plus du choix de la technologie, des coûts d'investissement et des besoins en capacité, la plateforme met en exergue la valeur du stockage pour l'électrification des mini réseaux par rapport à d'autres alternatives.

► *Données et projets accessibles* [sur la plateforme IRENA](#)

## Le Programme ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program)

Il est supporté par un consortium piloté par la Banque Mondiale et regroupant notamment l'Agence française de développement, l'Union européenne, le Canada, le Royaume-Uni, la Suisse, le Luxembourg, la Norvège, etc. L'objectif est d'aider à généraliser l'utilisation de la planification géospatiale de l'électrification à moindre coût, en particulier dans les pays ayant un faible accès à l'électricité.

La plateforme mondiale d'électrification (Global Electrification Platform, GEP) a été développée comme un outil open source et open data pour accélérer la réalisation de l'objectif de développement durable de l'accès universel aux services énergétiques modernes d'ici à 2030.

Cette plateforme permet l'évaluation de solutions de type réseau, mini-réseau et hors réseau et constitue un outil qui permet de comparer et d'évaluer les différentes possibilités. Elle peut être considérée comme une option peu coûteuse pour les pays en développement.

La GEP fournit un modèle mondial basé sur des scénarios de planification de l'électri-



Fig. 11 Ghana : exemple de scénarios mix, connecté au réseau et non connecté, d'accès à l'énergie

fication à moindre coût et une application de cartographie web. Le GEP Explorer, qui présente les résultats du modèle, permet aux utilisateurs d'ajuster certains paramètres qui affectent la planification de l'électrification.

► [Accès à la plateforme GEP](#)

## Le programme Philanthropies de Microsoft

En partenariat avec la communauté Humanitarian OpenStreetMap Team (HOT), il soutient des initiatives visant à utiliser l'IA pour créer des cartes en open data. Bing Maps a publié des données sur 17 millions de bâtiments en Ouganda et en Tanzanie. Microsoft Maps and Geospatial a également mis à disposition des données open data sur les empreintes de bâtiments, couvrant 36 millions de bâtiments au Nigéria et 15 millions au Kenya. Ces empreintes de bâtiments, générées par des algorithmes d'apprentissage automatique (machine learning) appliqués à l'imagerie satellitaire, ont été obtenues grâce à des images collectées entre 2020 et 2021 par Maxar Technologies. Les données sont disponibles gratuitement en téléchargement et avec utilisation sous licence.

Le **programme AFRICA Knowledge Platform**, supporté par l'Union européenne, met à disposition une plateforme de données et d'outils développée par le Joint Research Centre (JRC) de la Commission européenne.





**Fig. 12** Extraction de données des bâtiments pour analyse d'accès à l'énergie : Ouganda et Tanzanie

Le **Clean Energy Access Prioritiser** (CEAP) est une plateforme d'aide à la décision open source conçue pour identifier les zones prioritaires pour les déploiements et les investissements dans le domaine de l'énergie propre. Il intègre des fonctions de planification spatiale et permet aux utilisateurs d'évaluer les projets d'énergie propre grâce à différents critères comme la demande d'énergie ou les aspects environnementaux et socio-économiques.

Le **Clean Energy Access Tool** (CEAT) est un outil d'accès à l'énergie propre. Il permet une analyse géospatiale plus détaillée du contexte de l'énergie propre, en particulier pour l'électrification des infrastructures sociales essentielles telles que les centres de santé, les hôpitaux, les écoles et les camps de réfugiés. Le CEAT visualise les besoins en énergie des établissements de santé et les coûts technologiques associés.

## **03. Gestion de l'environnement des infrastructures et des événements climatiques**

L'étude et la surveillance de l'environnement des infrastructures, sont essentielles pour le déploiement et la surveillance de l'intégrité de celles-ci ainsi que pour l'évaluation des risques qu'elles encourent.

Les satellites jouent un rôle de plus en plus important dans ces études et dans l'évaluation des risques liés aux phénomènes climatiques extrêmes tels que les tempêtes, les inondations et les feux de forêt. En effet, ils permettent une meilleure compréhension des risques ainsi qu'une évaluation plus rapide de l'envergure des conséquences. Grâce aux données satellitaires, la mise en œuvre de stratégies d'adaptation aux risques pour protéger les infrastructures vitales est facilitée. Elles améliorent ainsi l'efficacité des mesures préventives, les analyses prédictives nécessaires à la mise en sécurité des personnes et des infrastructures et l'optimisation des interventions avant et après les incidents naturels.

Les principales études d'évaluation des risques et d'analyses d'impacts traitées avec les données satellitaires peuvent être catégorisées selon :

- L'identification et l'évaluation des contraintes liées au déploiement des infrastructures et des équipements en tenant compte de la nature des sols, des obstacles naturels, des bâtis existants et de la végétation,
- L'analyse des impacts sur la planification et le déploiement,
- Les détections des événements et l'évaluation des risques liés aux conditions météorologiques comme les tempêtes, les foudroiements, les inondations, les glissements de terrains ainsi que les incendies de forêt,
- L'évaluation des dégâts après incidents.

Il faut noter également que, pour les projets de déploiement de réseaux et de centrales, en raison d'obligations réglementaires, les études d'évaluation de risques et d'impacts environnementaux sont de plus en plus demandées dans les cahiers des charges, et ce, dès les phases de conception et de financement. Les analyses basées sur l'imagerie satellitaire semblent ainsi devenir incontournables dans l'élaboration de ces dossiers.

### **3.1 Gestion des risques liés aux glissements de terrain**

La surface de la Terre est en mouvement constant. Cela est dû à différents phénomènes naturels : activité tectonique, volcanique ou humaine (l'extraction des eaux souterraines

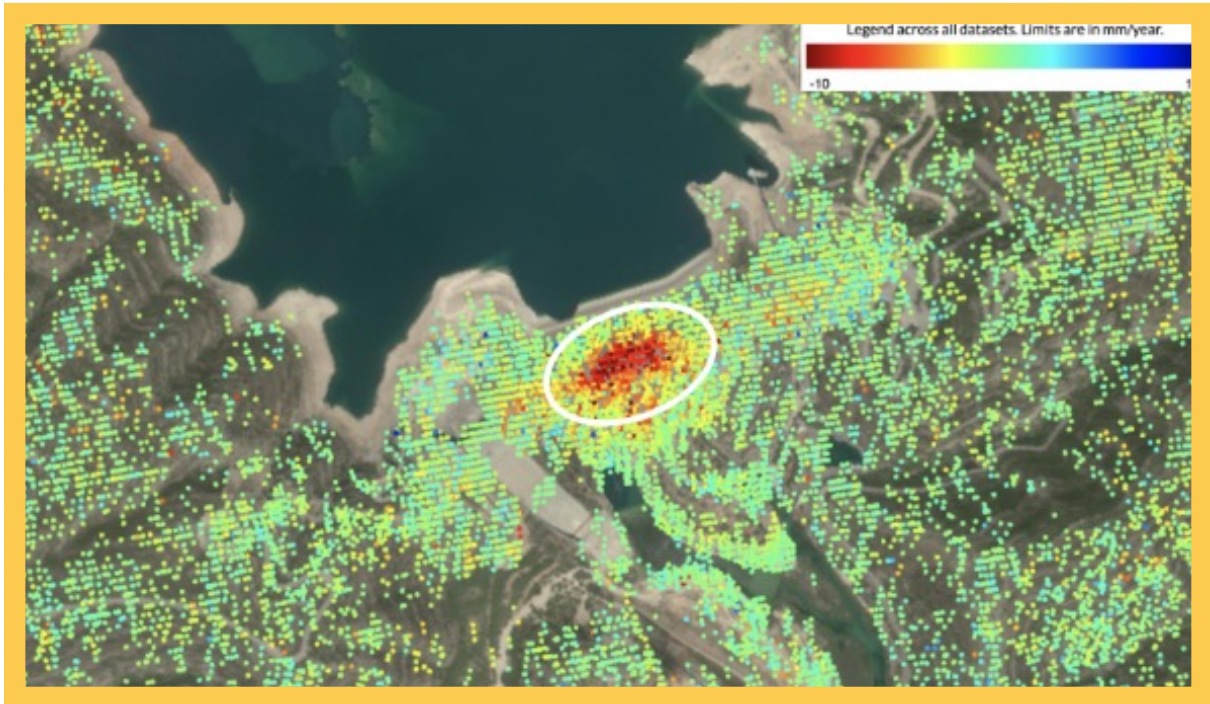
ou exploitation minière), glissements de terrains, contractions de sol liées aux écoulements d'eau ou à la sécheresse. Ce dynamisme de la surface terrestre peut entraîner des répercussions importantes sur les infrastructures, les réseaux et les écosystèmes naturels.

Ces dernières années, la prise de conscience croissante des risques liés aux mouvements de terrain a entraîné une demande d'informations complètes et fiables à leur sujet. Le Service européen des mouvements de terrain (EGMS - European Ground Motion Service) a été créé en réponse aux besoins des utilisateurs exprimés lors du forum des utilisateurs de Copernicus. Ce service est à la pointe de la technologie en matière de télédétection spatiale. Il utilise les données InSAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar) de Sentinel-1 pour détecter et mesurer les mouvements du sol en Europe avec une **précision de l'ordre du millimètre**. Du côté du secteur privé, la société finlandaise ICEYE a lancé récemment sa constellation de satellites SAR/InSAR qui offre une précision similaire et des taux de revisite d'une journée.

Ces technologies peuvent être utilisées pour une variété d'applications. Les autorités locales peuvent par exemple l'utiliser pour surveiller l'intégrité structurelle des barrages, des ponts, des chemins de fer et des bâtiments. Elles permettent également aux urbanistes de prendre des décisions fondées sur des données quant à l'emplacement des nouvelles infrastructures en évaluant la probabilité de risques naturels tels que les glissements de terrain. Les chercheurs peuvent également utiliser les données de l'EGMS pour étudier les effets du changement climatique comme le dégel du pergélisol et l'affaissement des côtes.

**Dans le domaine des réseaux électriques**, les mouvements de terrain peuvent entraîner des répercussions sur les infrastructures hautes comme les pylônes et les lignes, induisant de fortes inclinaisons avec risques de réduction des corridors, d'accrochage de branches ou bien de basculement, en particulier en zone montagneuse (voir fig. 13 ci-après).

De même certaines infrastructures plus critiques, telles que les barrages, peuvent être surveillées. La figure ci-après montre la détection d'une dérive **de 7,6 mm par an aux abords** d'un barrage en Espagne. La détection de mouvements de terrain dans les zones proches des infrastructures permet donc d'anticiper les risques d'accidents majeurs.



**Fig. 13** Image service EGMS Affaissement de terrain autour d'un barrage en Espagne (7,6 mm/an)

### **3.2 La gestion des infrastructures face aux conditions météorologiques**

Les infrastructures énergétiques sont particulièrement sensibles aux conditions météorologiques et vulnérables aux événements climatiques extrêmes. Une gestion proactive et une préparation adéquate peuvent atténuer les impacts de ces événements sur l'intégrité des réseaux électriques. L'utilisation des données météorologiques et de télédétection satellitaire joue un rôle majeur dans cette approche préventive. Les sections suivantes explorent comment ces données sont utilisées, d'une part lors des événements extrêmes, et d'autre part dans la gestion des variations météorologiques normales.

- **Les événements extrêmes**

Les événements climatiques extrêmes, comme les tempêtes et les inondations, peuvent entraîner des conséquences catastrophiques sur l'intégrité des infrastructures électriques. Ces impacts peuvent aller jusqu'à la rupture de lignes, l'effondrement en cascade de pylônes ou la submersion d'équipements. Les données météorologiques satellitaires sont utilisées en amont de l'événement pour fournir des prévisions précises. Ces prévisions permettent alors de préparer le réseau à une situation de repli, sur des portions susceptibles d'être moins impactées, grâce à des analyses de contingence et

de reconfiguration topologique, et ce, afin de limiter les risques de coupure généralisée.

En outre, la précision des prévisions des risques peut être améliorée en combinant les données satellitaires avec les données issues des systèmes de prévision d'orage et de localisation des foudroiements utilisant des réseaux d'antenne déployés au sol. Ainsi les zones susceptibles d'être touchées par les tempêtes et les foudroiements sont mieux identifiées, ce qui permet aux compagnies d'électricité de déployer les équipes et matériels d'intervention de manière optimale, de réduire les délais d'intervention, et ainsi, de minimiser les interruptions de service dans les zones impactées une fois l'événement terminé.

La plupart des compagnies d'électricité disposent de services de données prévisionnelles météorologiques qu'elles intègrent dans leurs centres de contrôle. Cette intégration permet donc une optimisation des opérations et renforce la capacité des réseaux électriques à résister aux événements climatiques extrêmes et à rétablir rapidement le service après une interruption.

Après une tempête ou un incident naturel, les images satellitaires permettent l'évaluation rapide de l'étendue des dégâts. Dans les heures ou les jours qui suivent l'événement (avec les satellites à période de revisite courte tels que Pleiade Neo et Sentinel 2), ces images permettent de visualiser de manière détaillée les zones touchées, notamment lorsque des chutes massives d'arbres ont entraîné des destructions étendues de lignes électriques.

Grâce à la haute résolution des images satellites, il est possible d'identifier précisément les emplacements où les infrastructures ont été endommagées ou détruites. Cette capacité de détection rapide est essentielle pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle permet aux gestionnaires de réseaux électriques de prioriser les interventions en fonction de la gravité et de l'étendue des dégâts. Les équipes d'intervention peuvent être déployées de manière plus efficace car elles disposent d'une vue d'ensemble des dommages et des obstacles potentiels sur le terrain. Cela améliore non seulement la sécurité des travailleurs mais aussi l'efficacité des opérations de restauration des infrastructures. Les zones les plus touchées peuvent être ciblées en priorité pour des réparations urgentes, ce qui aide à rétablir le service plus rapidement et à minimiser les perturbations pour les utilisateurs finaux.

Enfin, les données obtenues grâce aux images satellites peuvent être utilisées pour des analyses post-incident, et ainsi mettre en place des mesures préventives pour réduire la vulnérabilité des infrastructures face à de futurs événements extrêmes. En intégrant ces informations dans les plans de résilience, les compagnies d'électricité peuvent renforcer leur capacité à anticiper et à gérer les impacts des catastrophes naturelles sur leurs réseaux.





**Fig. 14** Observation des dommages et destruction du barrage hydroélectrique après la tempête à Derna en Libye en 2023 (Images Pleiades Neo (résolution 30 cms))

- **Les variations climatiques**

Les variations climatiques normales, telles que le vent, l'ensoleillement, la couverture nuageuse, la pluviométrie et la température ambiante, n'entraînent généralement pas de dégâts ou de coupures, mais influent fortement sur les productions d'électricité et sur l'efficacité des réseaux électriques.

Les données météorologiques classiques provenant de satellites jouent un rôle fondamental dans les analyses prévisionnelles de production d'électricité. Ces données sont souvent complétées par des capteurs locaux de température, des capteurs d'irradiation solaire et des anémomètres, qui peuvent être intégrés via l'Internet des objets satellitaires et ainsi fournir des informations précises et localisées pour l'ajustement et l'équilibrage du réseau en temps réel.

## **04. Opérations de maintenance et maintenance prédictive**

Les domaines d'intervention des images satellitaires dans la maintenance sont les suivants :

- Le géoréférencement des actifs d'infrastructures et des équipements avec les différents modes d'analyse et de représentation,
- La détection, le recensement et l'inventaire des actifs avec des technologies dites

de « robot mapping » utilisant des LiDAR, Scan 2D, 3D et analyse automatisée d'images,

- La gestion des actifs et de la maintenance (sur défaut et en mode prédictif), la gestion de la condition (état des actifs) et des risques de défaillance avec les solutions digitales de type APM jusqu'à la création de Jumeaux numériques,
- La gestion des interventions et des inspections sur site,
- La gestion de la végétation.

En lien avec ces domaines d'intervention, les objectifs opérationnels et économiques sont les suivants pour une compagnie d'électricité :

- **Améliorer la qualité des données sur les actifs.** La collecte et la vérification de données précises permettent d'obtenir des informations utiles sur les actifs et élaborer ainsi des modèles de « jumeaux numériques » efficaces pour la représentation fine des infrastructures, leurs conditions opérationnelles et différentes modélisations et simulations d'analyses de risques.
- **Surveiller l'état du réseau et prévoir.** La surveillance de l'état des actifs est importante car elle fournit des informations sur la santé des actifs. L'objectif est d'utiliser les informations sur l'état pour détecter les signes avant-coureurs de défaillances, permettant ainsi d'optimiser les programmes de maintenance et de remplacement dans une approche de maintenance prédictive.
- **Optimiser les opérations de maintenance.** Améliorer la rentabilité des programmes d'inspection et d'entretien en réduisant les dépenses et/ou en augmentant la valeur ajoutée des résultats des différents programmes.
- **Identifier efficacement les empiètements.** Les actifs critiques du réseau comprennent les pylônes, les traverses, les lignes conductrices. Les empiètements peuvent être dus à la végétation et aussi, dans de nombreux pays, la proximité des bâtis.

Les méthodes et les actions pour réaliser ces objectifs sont de plusieurs natures :

- **La réalisation des inventaires et la gestion des actifs**  
Ces activités concernent la création ou la mise à jour de bases de données détaillées d'inventaires souvent via la récupération et l'agrégation de données en provenance de sources multiples (GIS, Fichiers manuel, Excel, ERP, ...) qui peuvent être incomplètes ou peu à jour, et devant inclure la géolocalisation et les caractéristiques suffisamment détaillées de chaque actif (pylônes, câbles, isolateurs, postes électriques, bâtiments, transformateurs, etc). La connaissance précise et la localisation des actifs et leurs mises à jour restent souvent difficiles à atteindre en mode dynamique.

- **La réalisation des inspections au sol**  
Ces activités sont relatives aux inspections réalisées par les agents en ascension sur poteaux, aux inspections aériennes proches du sol sur plateforme élévatrice, ou à l'aide de perches, ou simplement aux inspections en visuel depuis le sol.
- **La réalisation des inspections aériennes**  
Ces activités sont réalisées soit en basse altitude avec des drones ou des hélicoptères, soit en moyenne altitude par des avions, ou des drones autonomes à aile fixe, soit, enfin, en très haute altitude avec des satellites.
- **Le traitement des données d'inspection**  
Le traitement des données d'inspection implique la collecte des résultats provenant des inspections et des tests, qui peuvent être manuels par saisie des résultats sur des fiches de tests (ou depuis récemment automatisés via des capteurs photographiques ou LiDAR). Par ailleurs, les analyses permettent d'obtenir un état des lieux et d'identifier les actifs et leur environnement, nécessitant des opérations de maintenance à court terme ou immédiate. Cette démarche inclut, outre les inspections mécaniques et électriques sur les actifs (comme par exemple, les fuites d'huiles, la corrosion, etc.), les analyses de la garde au sol des lignes, des dégagements des structures et des dégagements par rapport à la végétation.
- **Les analyses prédictives**  
Ces activités sont relatives aux analyses et aux calculs qui seront réalisés sur la base de modèles statistiques, scientifiques, ou avec l'aide d'IA, appliqués aux résultats des données d'inspections et des premiers traitements. Par exemple, les données sur la densité et la localisation de la végétation, ainsi que les prévisions de croissance de la végétation permettent l'évaluation des empiètements de ligne en mode prédictif.
- **La supervision (monitoring) en temps réel**  
Cette activité est relative à la mise en place de capteurs (IoT) en communication satellite ou terrestre pour détecter la foudre, les inondations, les incendies de forêts, les déformations de terrain, ou à la collecte d'informations issus des systèmes de télémétrie ou de SCADA par exemple.

#### **4.1 Les données satellitaires et les systèmes d'informations pour la maintenance**

Les compagnies d'électricité gèrent de nombreux systèmes d'information comme les ERP, la gestion des clients (CMMS), la gestion de la maintenance (GMAO) et la gestion des travaux (WFM) et d'outils de conduite avec les systèmes de supervision (SCADA), la gestion de l'énergie (EMS) ou encore la gestion de la distribution (DMS). Aussi, la plupart des utilities utilisent un SIG (en général d'un des leaders ESRI ou Smallworld). Pour les réseaux de distribution, ce dernier est souvent incomplet et compliqué à maintenir à jour



en raison du coût plus faible des actifs, de leur très grand nombre et de leur évolution.

La mise à disposition croissante des données satellitaires soulève des questions sur leur utilisation efficace et leur intégration dans l'environnement des systèmes d'information de conduite et de gestion pour la maintenance. En effet, le volume considérable de données, les hautes précisions des cartes ainsi que les nouveaux champs d'application nécessitent de réévaluer les modes opérationnels ainsi que les niveaux de performance requis des systèmes. Cela inclut les interfaces avec les systèmes existants, la capacité à traiter les volumes massifs de données, le bon niveau de complémentarité avec les SIG, la vitesse et facilité d'accès aux informations, les interfaces avec les GMAO et autres systèmes.

Les systèmes de GMAO avec gestion des travaux (WFM) sont des outils essentiels pour gérer les équipes et les ressources sur le terrain pour les travaux de routine ou pour les urgences. Par exemple, une ville comme Rio de Janeiro peut nécessiter jusqu'à 15000 interventions par jour. Le WFM organise les interventions et permet la collecte sur place des détails de chaque intervention.

Avec d'une part des parcs vieillissants, des réseaux en croissance et face aux contraintes réglementaires et environnementales, les compagnies doivent optimiser leurs infrastructures pour améliorer la durabilité des réseaux, minimiser les risques de défaillance et les coûts de maintenance. Les compagnies cherchent ainsi à s'équiper de systèmes de gestions des actifs (APM) qui intègrent les inventaires des actifs, le suivi des inspections de maintenance et des incidents, l'évaluation de l'état de santé des actifs et les analyses prescriptives et prédictives. Comme pour les GMAO, ces outils APM doivent être capables de gérer le volume massif d'informations de façon rapide voire des millions d'actifs pour les plus grands réseaux de transmission et de distribution. Les satellites contribuent alors à la performance des APM qui intègrent des cartographies satellitaires pour une visualisation holistique de l'état de santé du parc des actifs et de leur environnement. Cela représente un pas vers de véritables jumeaux numériques en temps réel de la condition de santé sur des représentations satellitaires.

## **05. Gestion de la végétation**

### **Dimensionnement de la problématique pour les compagnies d'électricité**

Une étude de Fortune estime que les dépenses en Opex pour la gestion de la végétation s'élèvent à 8 milliards de dollars annuellement aux États-Unis, ce qui pourrait se trans-

poser à environ 30 milliards de dollars à l'échelle mondiale.

De même, une étude du CNUC (*College of Nature Resources, USA*) auprès de plus de 60 compagnies d'électricité a montré que près du quart des incidents et des coupures étaient liés à la végétation.

Pour une compagnie d'électricité de distribution, la seule gestion de la végétation peut représenter à elle seule 30 % de l'OPEX, 10 à 15 % pour une compagnie de transport.

Une mauvaise gestion de la végétation peut donc impacter significativement les indicateurs de qualité de services clefs que sont les SAIFI (indice de fréquence d'interruption moyenne) et les SAIDI (Indice de durée moyenne d'interruption par clients). Au-delà des obligations et pénalités réglementaires, elle peut entraîner des conséquences dramatiques.

Un des exemples emblématiques est la série d'incendies qui a touché la Californie en 2017 en 2018. L'enquête a déterminé que les départs de flammes avaient été attribués à des arbres qui auraient dû être coupés et qui ont été en contact avec des lignes électriques opérées par la compagnie PG&E. PG&E a ainsi été exposée à des charges chiffrées en milliards de dollars pour défaut d'entretien et sous-estimation des risques. Ces incidents ont remis la notion d'exposition aux risques liés aux incendies en haut de la liste des priorités.

La gestion des actifs tels que les lignes et les pylônes électriques s'applique à des volumes considérables, se comptant généralement en centaines de milliers d'unités. Par exemple, EQL en Australie gère 1 500 000 pylônes, RTE en France en compte 262 000, et PG&E en Californie en possède 700 000, couvrant des distances de dizaines voire de centaines de milliers de kilomètres de lignes. Cette volumétrie, combinée à la diversité des territoires et à des densités de population très disparates, contribue à la complexité de la gestion de ces infrastructures. À titre d'illustration, la valeur estimée des réseaux de transmission et de distribution (T&D) installés aux États-Unis s'élève à 2 000 milliards de dollars USD.

C'est aussi un sujet réglementaire et de gestion des risques pour les compagnies. Les obligations légales de gestion de la végétation, les inspections obligatoires des pylônes et des lignes, ainsi que le suivi des zones à forte croissance démographique et les constructions non-planifiées sont des défis constants. Les réseaux électriques peuvent causer des dommages significatifs, notamment en déclenchant des incendies, particulièrement dans les régions forestières en période de sécheresse. De plus, elles doivent considérer les risques de glissement des pylônes dans les zones d'instabilité des terrains, comme les zones montagneuses, tropicales ou de sécheresse.

En résumé, la réduction des Opex, qui représente jusqu'à 30 % des dépenses totales

des compagnies aux États-Unis, associée à l'augmentation des contraintes réglementaires, sécuritaires et aux objectifs de réseaux plus résilients, pousse les entreprises d'électricité à rechercher des solutions performantes avec une approche holistique afin d'optimiser ces dépenses.

## La problématique des lignes avec la végétation

Une ligne électrique aérienne a ce que l'on appelle un sag (ou niveau d'affaissement,) qui dépend du conducteur, de la température ambiante, du vent tangential et du courant circulant dans la ligne, ainsi qu'un sway, qui est le balancement ou l'oscillation de la ligne en fonction du vent. Une ligne électrique n'est donc pas un équipement « statique » mais évolue verticalement et horizontalement. Relier le modèle aux données de fonctionnement est donc nécessaire pour l'évaluation des zones d'empiètement.

## Les inspections aériennes et satellitaires

Les compagnies font usage de différentes technologies et méthodes afin de répondre aux problématiques de gestion de la végétation telles que :

- Le survol en hélicoptère avec LiDAR et la photographie (spectre visible et proche infrarouge (NIRS)),
- L'usage des imageries satellitaires proche-infrarouge,
- L'usage de drones pour l'inspection des têtes de pylônes (RTE a par exemple a formé plus 500 opérateurs sur des drones Flying Eye),
- L'expérimentation aux USA et en Australie de vols de drones en vols autonomes et

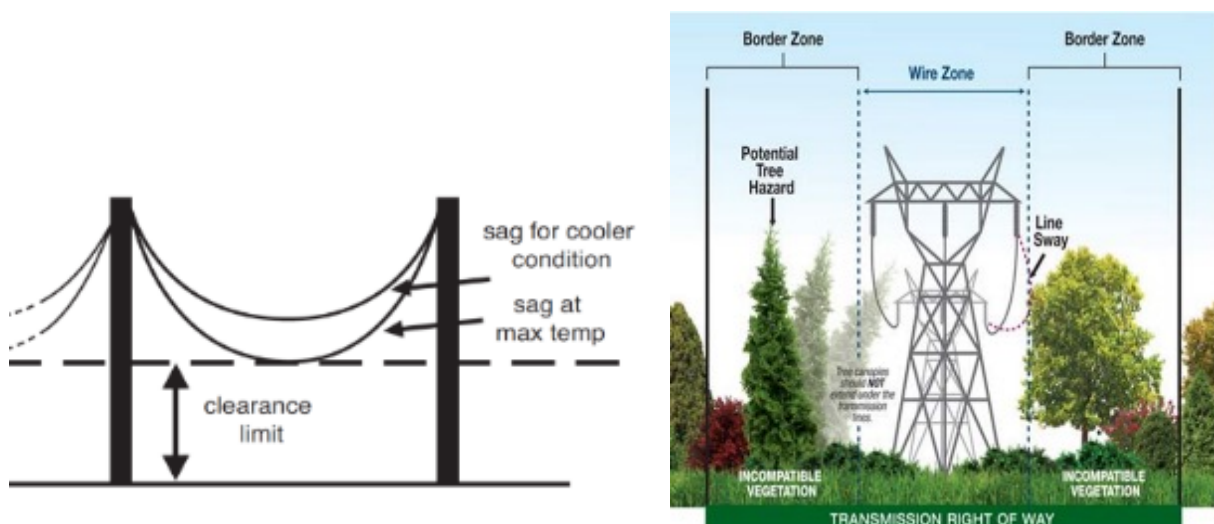


Fig. 15 Représentation des zones de sécurité liées à l'affaissement de la ligne (SAG) et oscillations (SWAY)

- « Beyond Ligne of Sight » (BVLOS) en accord avec les autorités de l'aviation civile,
- L'usage de LiDAR au sol afin de modéliser les infrastructures de distribution,
- L'usage au sol de caméras proche-infrarouge (NIRS) pour la végétation.

Malgré la dynamique du secteur des images satellitaires, la majorité des imageries encore utilisées aujourd'hui pour les inspections et la végétation sont d'origines aériennes (hélicoptère, avion et drones). Les satellites sont plutôt mobilisés pour la cartographie ou le support à la gestion des feux, avec des projets tels que :

- La collaboration en 2023 entre le CNES et la société Kayrros,
- La mission GardeFeu au Canada qui est prévue pour 2029. Cette mission GardeFeu consiste en une constellation de satellites dont les capteurs infrarouges mesureront l'énergie produite par les feux de forêt, appelée puissance radiative du feu (PRF),
- La collaboration entre le Cerema et le CNES en France pour caractériser les feux en intensité et en vitesse de propagation avec des données PRT (Puissance Radiative Totale).

Dans le domaine des suivis de feux, la définition actuelle en très haute résolution des images dans le domaine du visible (30 cm) commence à rendre exploitable l'imagerie satellitaire pour couvrir de larges zones. Cependant les résultats restent encore trop imprécis pour les empiètements de végétations sur les lignes, même dans le domaine multispectral.

### **Les données satellitaires pour la gestion de la végétation**

L'arrivée des constellations de satellites a considérablement réduit le coût des images satellitaires. Cependant, ces images ne sont pas encore couramment disponibles dans les bandes multispectrales nécessaires pour les analyses de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). L'interférométrie radar à synthèse d'ouverture (InSAR) reste encore problématique pour déterminer les empiètements.

Mais les images SAR et InSAR permettent des mesures d'élévation très précises sur des volumes de végétation (moins sur les têtes des arbres eux-mêmes). La fusion et l'interprétation de données optiques avec les données Radar permettent d'améliorer l'évaluation des zones de corridors et les risques d'empiètement.

## Utilisation des photos aériennes et LiDAR en combinaison avec les images satellites

Plusieurs projets ou des sociétés déjà existantes (comme Liveo) travaillent sur l'amélioration des évaluations en combinant les images satellites avec les données photographiques aériennes et LiDAR.

La mise en œuvre de l'Intelligence Artificielle pour le traitement des données renforce la capacité de fusionner et corrélérer les résultats de différentes opérations : survol de drones classiques, inspection au sol et, captures LiDAR des infrastructures. Les applications de l'IA pourraient s'étendre jusqu'à la préconisation d'actions à différentes échelles de temps, incluant les approches prédictives. Les impacts liés aux changements climatiques (inondations, glissements de terrains en zone montagneuse) et les mégafeux rendent d'autant plus opportune l'utilisation de ces nouvelles capacités de traitement.

Une compagnie d'électricité comme EQL (Queensland Australie) a affiché une ambition globale sur ces sujets avec la mise en place d'un système de bases de données complet et cohérent. Cette approche vise à gérer le volume et la diversité des informations collectées pour optimiser les politiques, d'inspections ou de gestion de la végétation. Cette étape constitue un préalable à l'application d'un processus de Machine Learning sur des données hétérogènes.

### 5.1 Dynamique de l'Imagerie Aérienne

En préambule et à titre indicatif, les ordres de grandeur des coûts d'heures de vol peuvent être appréhendés ainsi : un drone, en vol autonome, volera environ trois fois moins vite qu'un hélicoptère, et ainsi une mission drone durera donc 3 fois plus longtemps. Ameren cite aux États-Unis une heure de vol d'hélicoptère tout compris à 9000\$/h à comparer à 750\$/h pour un drone.

### L'usage des LiDAR

L'acronyme LiDAR signifie *Light Detection And Ranging*. Pour rappel, un LiDAR est un équipement électronique qui fait partie de la famille des capteurs de temps de vol (ToF). Un LiDAR utilise un faisceau optique laser, pour la détection, l'analyse et le suivi. C'est une méthode de calcul qui permet de déterminer la distance entre le capteur et l'obstacle visé.



Les acteurs de l'imagerie aérienne sont sur un marché fragmenté, tant par géographie (environ 50 % en Amérique du Nord) que par usage. Ainsi les principaux leaders ne représentent pas plus de 25 % du marché mondial.

Il reste cependant intéressant d'examiner leur portefeuille car ils sont les plus à même, par acquisition de startups innovantes ou par développement interne, de bénéficier de la transversalité des applications accélérant l'intégration d'images provenant de sources différentes et profitant de traitements automatisés de masse pour des domaines précis. Citons quelques acteurs nord-américains : Blom ASA, Digital Aerial Solutions, Cooper Aerial Surveys, Fugro, Landiscor Aerial Information, EagleView Technology, Nearmap, Kucera International, Quantum Spatial, Terra Flight Aerial Imaging Inc.

### **Dynamique de l'Imagerie Aérienne – cas des drones à pied d'ouvrage**

L'évolution des capacités des drones à pied d'ouvrage, autonomes, et actionnables sur évènement (ou via le Cloud), initiés en 2019 à Singapour et en Chine, sont aujourd'hui au catalogue de constructeurs de drones tel que DJI en solution industrielle.

Ces équipements permettent une inspection préprogrammée à la suite d'un incident, une condition climatique permettant par exemple de faire état d'une sous-station électrique ou d'un tronçon de corridor (si tant est que la législation nationale autorise les vols autonomes). Aujourd'hui, DJI commercialise le DJI Dock à cet effet en solution standard.

## **Le mix des données et la consolidation de l'offre**

À ce stade, très peu d'acteurs se sont positionnés sur des solutions globales mixant le panel de technologies (satellite, drones, aériens, IoT, etc.). Autant il y a un très grand nombre d'acteurs régionaux ou globaux couvrant une partie de l'offre, autant très peu d'acteurs se sont organisés pour couvrir l'ensemble du domaine. Ce facteur n'est pas lié à la fragmentation naturelle des compagnies quand il s'agit de service, mais à la complexité liée à la fragmentation des technologies.

Des acteurs clés commencent à s'organiser en offre de valeur plus large et sur un périmètre géographique étendu. L'arrivée récente (en termes de solutions) et la percée de l'Intelligence Artificielle en de nombreux domaines va sans aucun doute accélérer les capacités d'analyse des volumes de données gigantesque générées par la captation d'imagerie satellitaires, ou aériennes (drone, avion, hélicoptère) mais aussi renforcer les analyses instantanées de photographies d'inspection.

Les offres de solutions multi-technologies et multi-produits, appuyées par une plateforme et des applicatifs d'analyse automatique d'image, vont sans nul doute rapidement transformer, si ce n'est révolutionner, ce marché.

05

---

**Les capteurs**  
**IoT Satellites**



**D**ans le domaine des capteurs IoT (Internet des Objets), notamment ceux connectés à Internet via des communications satellitaires, la mesure de l'état opérationnel des lignes et des pylônes de transmission est en pleine évolution. La technologie qui s'impose actuellement sur tous les continents est le DLR (Dynamic Line Rating). La question est ouverte sur l'extension de ces capteurs pour mesurer d'autres informations telles que le bruit (effet couronne), la présence d'activité sous la ligne, le mouvement et l'inclinaison des pylônes.

Dans le domaine de la distribution, il y a aussi des évolutions en Amérique du Nord sur des équipements de mesure (température, courant, tension, détection de défaut) avec des recherches pour rendre ces IoT plus complets (mesure du SAG, oscillation, détection feu, imagerie) avec une approche simplifiée de l'installation et une autonomie (auto-alimentation) des capteurs IoT sur la ligne.

Les cadres réglementaires évoluent et il est difficile de construire de nouvelles lignes dans beaucoup de régions du monde. Par exemple l'ACER en Europe (Agence des Régulateurs Européens) impose dorénavant aux compagnies d'électricité de mesurer et fournir au marché la capacité en temps réel des lignes des corridors (et des lignes contraignantes) hors corridor, ce qui va nécessiter de mesurer en temps réel, soit en IoT, soit par station météo et modélisation, un grand nombre de lignes de transmission. Tous les projets de construction de nouveaux actifs seront refusés si ceux existants ne sont pas utilisés au maximum de leur capacité en temps réel, ce qui devrait augmenter le besoin d'équiper les lignes avec des capteurs IoT sur satellite, en cas de manque de couverture radio terrestre.

Il y a de nombreux travaux pour installer ces IoT de façon économique (brevet «Schneider Electric» pour installation d'IoT par drones sur les réseaux MT par exemple). L'Internet des objets (IoT) est un élément clé dans la création de véritables jumeaux numériques des conditions opérationnelles des actifs. En fournissant des données en temps réel, l'IoT permet d'améliorer la modélisation complète de l'état des actifs, pour une gestion plus efficace.

En termes d'IoT, la majorité de l'instrumentation actuelle se trouve dans les postes électriques, que ce soit pour la transmission ou la distribution. Toutefois, la nécessité de surveiller de nombreuses infrastructures éloignées de ces postes, ainsi que les exigences de gestion des risques naturels (incendies de forêt, mouvements de terrain, effondrements), incitent à envisager de plus en plus l'utilisation de capteurs sur les lignes et les pylônes (voir aussi la surveillance des capacités de corridors de lignes ci-dessus). Le développement de capteurs communiquant par satellite résout le problème des zones «blanches», particulièrement pertinent pour les régions étendues et montagneuses.

**Voici quelques exemples de projets et sociétés dans ce domaine IoT satellitaires :**

- La société Kinéis en France avec une constellation de satellites prévue en 2024, pour des projets de détection d'incendie avec capteur feux DRYAD,
- La société Swarm aux USA,
- La société LeoBlue en France avec une messagerie bluetooth/satellite pour l'envoi d'alertes catastrophes naturelles.

# 06

---

## Exemples de projets

# CPCS (Canada)

[cpcs.ca](http://cpcs.ca)

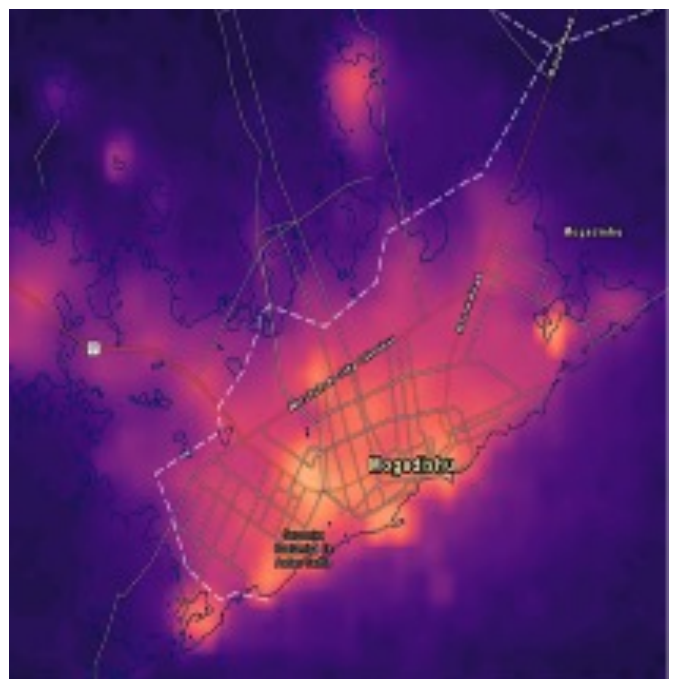
CPCS est une société de conseil internationale dans le secteur des infrastructures (transport, énergie) et des partenariats public-privé (PPP). CPCS développe des outils pour le traitement de données volumineuses issues de cartographies/vidéos/photos/images pour l'identification, la caractérisation et le géoréférencement des infrastructures.

## Technologies principales

- Photographie HD et GPS
- Reconnaissance image par AI
- Caractérisation et géo- référencement des équipements MT et BT ((poteaux, transformateurs, isolateurs, bras transversaux, lanternes d'éclairage public, etc.)
- Utilisation des images satellites relatives à l'éclairage nocturne (Night Time Light - NTL) corrélées avec l'activité économique, l'urbanisation, la densité de population, pour analyse de la couverture en électricité afin d'optimiser la planification et le déploiement du service électrique.
- L'analyse des NTL utilise les images VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), corrige les perturbations atmosphériques et radiométriques pour améliorer l'analyse des zones à faible luminosité.

## Projet

- L'intelligence artificielle au service de la cartographie des réseaux de distribution électrique, en collaboration avec l'ASER et Senelec (Sénégal)
- Modélisation de l'extension du réseau de distribution de Mogadiscio (Somalie)



# ALTEIA (France)

<https://alteia.com>

Alteia offre un ensemble complet d'outils permettant d'agréger, de contextualiser et d'analyser rapidement les données visuelles d'images aériennes, satellites et enrichies d'autres sources de données.

## Type de services

- Géoréférencement des infrastructures du réseau réel par imagerie (Satellite, mobile mapping, aérien)
- Recensement et analyse des fermes solaires par imagerie (Satellite, mobile mapping, aérien)
- Suivi de chantier de construction des fermes solaires
- Gestion de la maintenance par planification de la collecte, ingestion, analyses de données visuelles (photos, LiDARs, vidéos) par IA pour la détection de défauts et pour des inventaires
- Gestion de la végétation
- Identification des impacts des événements climatiques par comparaison avant/après une tempête

## Technologies principales

- Données satellitaires optiques
- Orthophotographies aériennes, scans LiDAR (avion, hélicoptère, voiture)
- Google Streetview, plateforme Aether (ALTEIA) de gestion des données visuelles avec déploiement d'IA pour les traitements

## Projet

- Sélection du site
- Suivi avancement du chantier
- Analyse des anomalies pour la gestion de la maintenance



# MASAE (France)

[www.masae-analytics.com](http://www.masae-analytics.com)

Masae Analytics fournit des services, essentiellement en Afrique, en Europe de l'Est et au Moyen-Orient, sur la cartographie des besoins à la suite de dommages de guerre ou de catastrophes naturelles. Dans le domaine énergétique, Masae évalue le potentiel de couverture et d'électrification des zones hors réseau (off-grid) et utilise des données d'infrastructure et socio-démographiques géoréférencées pour aider à cibler des zones à fort potentiel de développement d'activité.

## Type de services

- Segmentation des zones rurales en fonction de la demande d'électricité (pour les développeurs de mini-réseaux)
- Estimation de l'accès à l'énergie et de la densité de population dans les camps de réfugiés
- Cartographie de l'infrastructure électrique existante dans des districts spécifiques
- Géoréférencement des infrastructures et des équipements
- Gestion de la végétation et des lignes vulnérables
- Identification des zones touchées par des catastrophes naturelles et impact sur les infrastructures énergétique/télécommunication

## Technologies principales

- Données Satellites RGB
- Sources d'imagerie satellitaire pour l'éclairage nocturne (NTL)

- Données de tracé routier en open source et algorithmes pathfinder pour redessiner le réseau

## Projet

### Sélection des zones prioritaires de déploiement de mini-réseaux (microgrids) au Libéria.

L'objectif était de cibler les zones non électrifiées ou peu fiables avec la plus grande densité de population, le plus grand besoin en électricité et viable économiquement.





# IGN avec IGO (France)

[www.igo.fr](http://www.igo.fr)

IGO développe des services et outils pour la structuration et l'analyse des données aériennes, satellitaires ou terrestres (LiDAR) avec des partenaires comme (IGN, Geofit, Aerodata, etc.) ou fournis par les clients, pour les exploiter en 3D.

## Type de services

- Représentation 3D des infrastructures (lignes, postes) pour améliorer l'aide à la décision, à la concertation et la communication vers les citoyens
- Aide à la maintenance de la végétation
- Optimiser, en temps réel, le transit des lignes en fonction de la météo, de la végétation

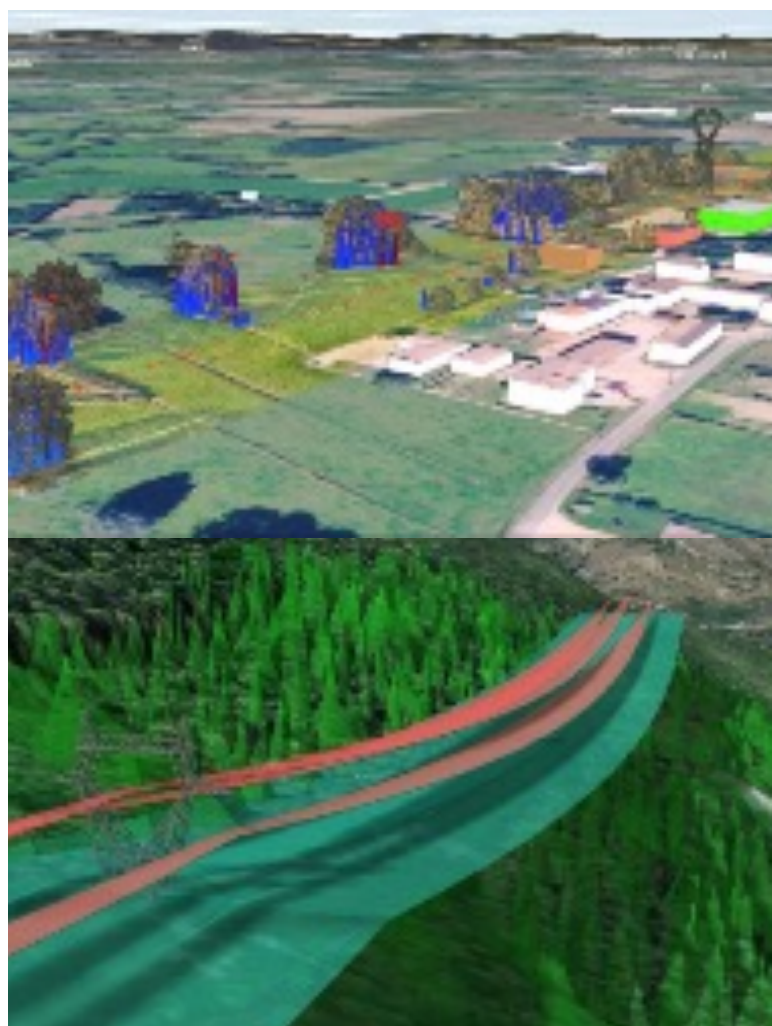
## Technologies principales

- Données Satellites RGB
- Cartographie
- Photo aérienne, LiDAR
- Logiciel de traitement 3D (Skyline)
- Satellite RGB, photo aérienne, LiDAR embarqué sur Hélicoptère
- Détection Végétation : prise en compte de la 3D pour calculer les emprises
- Intégration des données LIDAR et des résultats de calculs
- Visualisation des points d'élagages

## Projet

### Gestion du patrimoine (Asset Management)

- Améliorer la sécurité et la maintenance – RTE



# MÉTÉORAGE (France)

[www.meteorage.com](http://www.meteorage.com)

**METEORAGE est une entreprise spécialisée dans la détection de foudre et d'éclairs. Elle opère un réseau de détection de capteurs au sol en France qui s'est étendu à la majeure partie de l'Europe, avec des services disponibles à l'échelle mondiale.**

## Type de services

- Évaluation des risques liés à la foudre pour protection des infrastructures énergétiques
- Anticipation des risques imminents de foudre pour aider à la prise de décisions pour les opérations et la sécurité
- Suivi de l'évolution des orages et des tempêtes en temps réel
- Vérification des lieux impactés par la foudre après un orage, évaluation des dommages potentiels sur les réseaux électriques

## Technologies principales

- Antennes électromagnétiques
- Recollement d'informations avec les données satellitaires et météorologiques
- Réseau de capteurs de type antenne électromagnétique au sol pour localisation précise de l'impact foudre
- Recoupement avec données et cartes météorologiques satellites
- Représentation sur fond de carte ESRI, Google, etc.) pour visualisation et géoréférencement

## Projet

- Gestion de la foudre pour les compagnies d'électricité RTE, Elia
- Prévion et identification de la foudre
- Estimation des risques
- Corrélation avec lignes touchées et les impacts détectés à proximité
- Adaptation du réseau (production et cheminement)





# KAYRROS (France)

[www.kayrros.com](http://www.kayrros.com)

Kayrros est une entreprise spécialisée dans l'analyse avancée de données pour le secteur de l'énergie en exploitant le potentiel des images et des données satellitaires, combinée à l'intelligence artificielle.

## Type de services

- Surveillance des émissions et des fuites de méthane
- Suivi du déploiement de projets en énergie renouvelable et capacité de production
- Suivi des stocks de pétrole par la mesure de hauteur de cuve
- Suivi des feux de forêts
- Cartographie des infrastructures par analyse images satellitaires
- Faisabilité de la cartographie des réseaux électriques HT en Côte d'Ivoire
- Utilisation des données satellitaires - Sentinel 1P, 2P, 5P
- Détection de fuites et des sources d'émissions de méthane à partir des données satellitaires
- Détection automatique de pylônes et de lignes par interprétation d'images satellitaires en HD. (Pléiades, Planet, Maxar)

## Technologies principales

- Données satellites images et météorologiques (Sentinel, Hyperspectrale, Infra Rouge)
- Traitement des données en temps réel avec IA pour une optimisation des productions solaire et éolienne, anticipation des productions

## Projet/Technologies

- Surveillance des émissions de méthane (mondial)
- Secteur pétrole / gaz



# Schneider Electric (France)

[www.se.com](http://www.se.com)

Schneider Electric est une entreprise multinationale française spécialisée dans la gestion de l'énergie et l'automatisation. Dans le domaine de l'Asset Management, Schneider Electric intègre des solutions avancées qui comprennent l'utilisation d'images satellitaires pour la surveillance et la maintenance prédictive des infrastructures énergétiques avec leur solution Asset Strategy Advisor.

## Type de services

- Outils de gestion des actifs pour la maintenance
- Gestion de la végétation
- Recalage des actifs (les images satellites permettent de faciliter et accélérer la localisation des assets, le pointage au GPS étant fastidieux à grande échelle.
- Analyse des risques sur plateforme « Asset Strategy Advisor »

## Technologies principales

- Asset Strategy Advisor
- GIS ArcFM

## Projet/Technologies

- Identification du risque végétation sur l'agglomération de LOME (CEET Togo)
- Identification de la probabilité et de la conséquence de défaillance des conducteurs Moyenne Tension dû à la végétation pour optimisation des élagages préventifs
- Images satellite 3D, résolution 0,5m (Stéréo) et 2D en résolution 3m fournies et préanalysées par les sociétés LiveEO et Overstory



# HEXACODE (Canada)

[www.hexacode.ca](http://www.hexacode.ca)

Hexacode est une start-up canadienne qui a développé une plateforme APM permettant de créer un jumeau numérique temps réel de la condition opérationnelle des infrastructures critiques de types électrique, mécanique, civil.

## Type de services

- Jumeau numérique de l'état de santé des actifs de type APM
- Intégration de modèles de calculs, d'inventaires d'actifs

## Technologies principales

- Plateforme logicielle Hexacode APM avec inventaire géoréférencé, et permettant un historique
- Évaluation de la condition par modélisation, système temps réel, inspections, et intégration de modèles IA
- Analyses prédictives et prescriptives
- Visualisation des actifs et résultats sur cartes géographiques GoogleMaps, ESRI world imagery, OpenStreetMap

## Projet/Technologies

- Représentation des actifs du réseau (poteaux, disjoncteurs, pylônes, transformateurs, etc.)
- Évaluation de l'état de santé pour réduction des risques de défaillance, optimisation des opérations de maintenance

- APM avec suivi des inventaires
- Suivi des inspections et tests
- Modélisations des dégradations
- Diagnostics et alarmes
- Historiques des événements et changements
- Statistiques par modèles d'actifs et de l'ensemble du réseau.
- Visualisation de l'état et des alarmes sur carte géographique avec statistiques





# RTE (France)

[www.rte-france.com](http://www.rte-france.com)

RTE est le gestionnaire du réseau de transport d'électricité de France qui comprend 100 000 km de lignes HT, 7000 km de lignes souterraines HT, 2900 postes électriques et 37 interconnexions avec les pays voisins.

## Projet/Technologies

- Gestion de la végétation
- Prévisions de la production Eolien et PV infraday et day +1
- Plan de defense (black-out)
- Détection de mouvements de terrain et d'ouvrage
- Gestion des actifs (Projet Mona)
- Projets Challenge Copernicus (Détection végétation, Sécurité des infrastructures)
- 15 hélicoptères, 500 télépilotes de drones. LIDAR pour mesure de la hauteur de la végétation à proximité des lignes électriques), Images satellitaires en support
- Systèmes PMU (Synchro GPS)



# VIDA Place (Allemagne)

[www.vida.place](http://www.vida.place)

VIDA propose des données de risques fiables pour tout actif physique et portefeuille à l'échelle mondiale. Cela inclut des données spécifiques à chaque emplacement sur les risques climatiques, la biodiversité, les indicateurs environnementaux, les conditions sociales et de gouvernance, le potentiel d'énergie renouvelable, et plus encore.

## Type de services

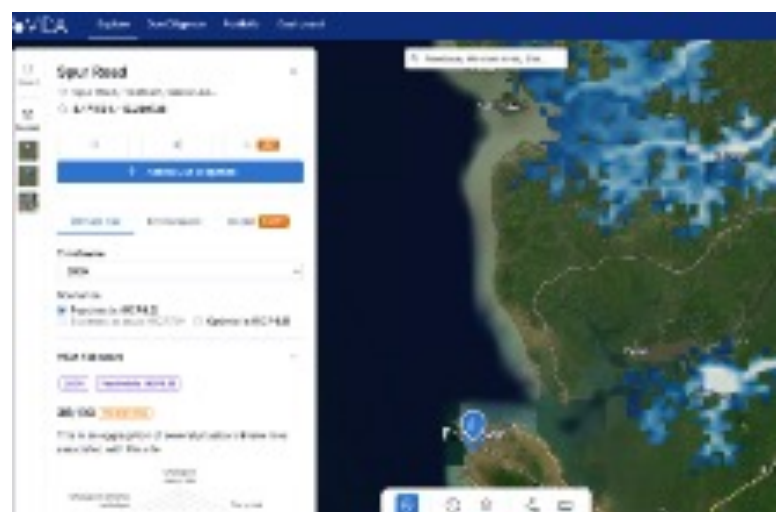
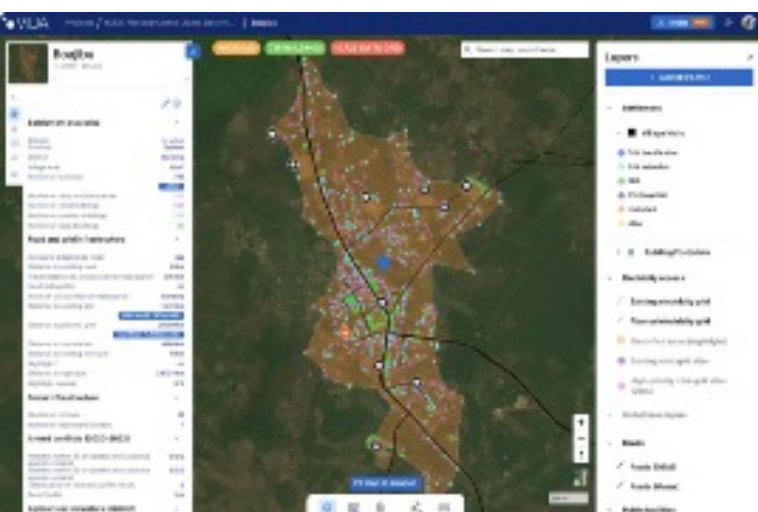
- Logiciels cartographiques
- Services d'analyses

## Technologies principales

- Logiciel cartographique pour évaluer les opportunités de déploiement et les risques liés à la localisation des infrastructure urbaines, civiles, centrales d'énergie renouvelable

## Projet/Technologies

- Sélection des meilleures opportunités pour les emplacements
- Évaluation des risques naturels
- Analyse spatiale des zones de population, activités, risque d'inondations
- Outils d'analyse avec intelligence artificielle multi-sources techniques et économiques



# Enedis (France)

[www.enedis.fr](http://www.enedis.fr)

Enedis est l'opérateur principal du réseau de distribution (MT) d'électricité de France.

## Projet/Technologies

- Cartographie réseau sur carte satellite
- Détection des anomalies sur les lignes et poteaux MT (par drone avec la société Alteia)
- Construction jumeaux numériques avec données géo, satellite pour étude et planification
- Détection inondation avec corrélation image satellite et capteur terrestre
- Camera HD sur drones
- IA pour détection automatique des organes et anomalies
- Télépilotes de drones. LIDAR pour mesure hauteur de la végétation à proximité des lignes électriques), Images géo en support



# GE Vernova (France)

[www.hexacode.ca](http://www.hexacode.ca)

GE Vernova est une entreprise multinationale spécialisée dans la gestion et l'automatisation des réseaux d'énergie. Dans le domaine de l'Asset Management, GE développe des solutions digitales avancées qui comprennent l'utilisation d'images satellites appelées Visual Intelligence pour la surveillance et la maintenance prédictive des infrastructures énergétiques.

## Type de services

- Performance de la gestion des actifs pour la maintenance
- Gestion de la végétation
- Projets et services clé en main

## Technologies principales

- Visual Intelligence
- GIS SmallWorld

## Projet/Technologies

- Gestion de la végétation
- Planification et modélisation de réseau
- Système de gestion de la performance des actifs pour la maintenance prédictive et préparation des interventions terrains.
- Gestion des données météo et photos aériennes et LiDAR pour prévision production et analyse d'incidents







---

# Acteurs

Un ensemble de sociétés et d'organismes actifs dans le domaine de l'étude sont listés dans le tableau ci-après. La liste présente des acteurs qui ont directement participé aux entretiens menés lors de la réalisation de l'étude (noms soulignés dans le tableau), ou qui ont été mentionnés pendant les échanges ou identifiés lors de la recherche bibliographique. Le secteur étant dynamique, cette liste n'est pas exhaustive et ne représente qu'un échantillon des acteurs.

● Organisation ● Entreprise ● Start-up

Société	Offre
● ABSOLUTE SENSING	Capteurs satellites Optique IR
● AEROSPACE VALLEY	Pôle de compétitivité
● AIRBUS	Satellites Pleiades, SPOT, Vision, SAR Radar Constellation, Imageries
● ALTEIA	Intelligence Imagerie (tout type sources)
● ASTROCAST	Satellite IoT
● CLS /ALTAMIRA	Intelligence imagerie (InSAR pour monitoring des glissements)
● CNES	Support Programmes technologiques et exploitation des données
● CPCS	Intelligence Imagerie
● DATA TERRA	Groupement acteurs (CNES, ...) Intelligence Imagerie
● DGE	Soutien innovations spatiales / France 2030
● ENEDIS	Utility
● ESA	Satellites (Sentinel, Galileo, MeteoSat, ...)
● ESRI	GIS et Intelligence imagerie
● EXPERTISE FRANCE	Groupe expertise technique et projet de l'AFD
● GENERAL ELECTRIC	GIS, APM, et intelligence imagerie
● GEO4I	Intelligence Imagerie
● GEODIGITAL	Intelligence Imagerie
● GLOBEO	Intelligence Imagerie
● GOOGLE	Fournisseur Images Satellites, Aériennes, Terrestres
● HEXACODE	APM, Intelligence imagerie
● IGN	Intelligence cartographique, imagerie
● IMMERGIS	Intelligence Imagerie
● JAKARTA	Intelligence Données LiDAR
● JRC	Centre recherche Communauté Européenne
● KAYRROS	Intelligence Imagerie
● KINEIS	Capteur IoT satellite
● MASAE ANALYTICS	Intelligence Imagerie
● METEORAGE	Capteur et localisation de foudre
● NOVELTIS	Contribution Programme Satellite et Intelligence imagerie
● PIXSTAR	Intelligence Imagerie

● PRELIGENS	Intelligence Imagerie
● QUANT-CUBE	Intelligence Imagerie
● REUNIWATT	Intelligence Imagerie / Prévision Irradiation Solaire
● RTE	Utility
● SCHNEIDER ELECTRIC	GIS, APM, Intelligence Imagerie
● SIXENSE	Intelligence Imagerie (Glissement)
● SATELLITE VU	Intelligence Imagerie (Température)
● TOMORROW.IO	Intelligence Imagerie (Prévision météo)
● THALES -TELESPAZIO	Satellites Pleiades, SPOT, Vision, SAR Radar Constellation, Imageries
● UP42	Intelligence Imagerie
● VIDA PLACE	Intelligence Imagerie
● VITO REMOTE SENSING	Intelligence Imagerie
● ZESCO	Utility

08

---

# Perspectives

## 01. Taille du marché

Le marché des données et technologies satellitaires est en pleine croissance, porté par la multiplication des satellites d'observation de la Terre, la baisse des coûts d'accès aux données, le développement des capacités de traitement et d'analyse et la demande croissante des secteurs utilisateurs, dont celui de l'énergie. Selon une étude du cabinet Euroconsult, le marché mondial des données satellitaires devrait atteindre **8,1 milliards de dollars** en 2029, contre 4 milliards en 2019, soit une croissance annuelle moyenne **de 7,2 %**. Le secteur de l'énergie représente **environ 10 %** du marché actuel, soit **400 millions de dollars** et devrait connaître une croissance similaire à celle du marché global.

Les applications actuelles les plus fréquentes concernant l'analyse d'images se concentrent principalement sur **la planification et l'expansion des réseaux électriques, sur l'évaluation des risques naturels et sur la surveillance à grande échelle** des corridors des lignes de transmission pour identifier les zones nécessitant une maintenance de la végétation.

## 02. Les limites et freins actuels

Toutefois, dans le secteur énergétique et électrique qui a un long historique de technologies et d'usages opérationnels dits « terrestres », il existe encore des freins à lever, dont les principaux sont listés dans le tableau ci-après :

Nature	Limitations et Impact sur le secteur des réseaux électriques et d'énergie
Résolution	Les résolutions optiques hautes (2m-20m) en open data restent encore insuffisantes pour identifier et recenser les actifs des réseaux de distribution MT, les lignes et une partie des réseaux HT. La détection de défauts sur l'infrastructure même n'est pas encore atteignable. L'évaluation de la distance de la végétation au contact des lignes électriques n'est pas suffisamment précise pour évaluer les risques d'empiétement.
Temps de revisite	Un temps de revisite long (plusieurs jours) limite la capacité à surveiller les incidents et les dommages à la suite d'événements techniques ou naturels (bris de pylônes, incendies, etc.)
Capacité de détection	Les captations optiques sont limitées par les conditions météorologiques (nuages) et l'ensoleillement entraînant des retards potentiels dans la mise à jour des images. Ces images peuvent être complétées et hybridées avec les données SAR et InSAR mais nécessitent des traitements complexes pour interpréter les données. La détection de pylônes et lignes par hybridation d'image InSAR et optique est encore trop récent.
Coûts	Les coûts associés à l'acquisition de données très hautes résolutions ou spécifiques et à leur traitement avancé peuvent être prohibitifs pour certains projets (prix au km <sup>2</sup> pour des zones étendues, coût et délai pour une demande de visée sur une zone précise).
Formation et Expertise	L'interprétation correcte des images satellitaires, surtout pour les applications techniques comme la surveillance des réseaux électriques, nécessite des compétences spécialisées nouvelles et un changement d'approche opérationnelle qui demande du temps au sein des entreprises.

## Levée des freins et optimisation de l'utilisation des données géospatiales

Certains obstacles peuvent être surmontés grâce à la sensibilisation et à la formation des acteurs du secteur sur les opportunités offertes par les données spatiales. Ces données doivent être fiables et sécurisées tout en offrant des performances de détection supérieures à des coûts compétitifs par rapport aux autres technologies terrestres ou aériennes.

Dans le domaine des données payantes, un effort de normalisation est également nécessaire. Cela permettrait de réduire les coûts de traitement et d'interprétation des données provenant de sources multiples, rendant leur utilisation plus efficace et économique.

### 03. Perspectives

L'accès aux données satellitaires a considérablement évolué ces dernières années grâce à une transition vers une ère où l'open data, le cloud et le big data jouent un rôle central. Ces technologies ont révolutionné la manière dont les données satellitaires sont stockées, traitées et mises à disposition. Les plateformes d'accès aux données et services, telles que Google Earth Engine, Copernicus Open Access Hub, Maxar, Planet Labs, offrent des accès simplifiés à d'immenses quantités de données satellitaires ouvrant la voie à des analyses complexes et à grande échelle.

Cette transformation favorise les partenariats et les collaborations, réduisant les silos entre les disciplines. Les initiatives open data encouragent le partage des connaissances et des données, renforçant les efforts de recherche et de développement au sein de la communauté scientifique et parmi les professionnels de l'industrie. Cette ouverture facilite les collaborations transversales, permettant le croisement des données satellitaires avec d'autres types de données, comme les captations optiques, radar aériennes et terrestres, les capteurs physiques de réseaux et de terrains, les systèmes d'informations et de supervision temps réel.

Dans ce contexte, les nouvelles générations de satellites comme Worldview3-4 ; Pléiades-Neo, offrent des résolutions spatiales nettement améliorées, **entre 0,3 et 0,5 mètre** avec des fréquences de revisite réduites à moins de 24 heures. La nouvelle constellation Worldview-Legion promet des taux **jusqu'à 15 visites/jour**. Les constellations ICEYE offrent des précisions millimétriques en technologies InSAR et les premières imageries avec représentations de lignes, pylônes ou détails de végétations apparaissent.

Parmi les avancées les plus significatives, les capacités de traitement des données brutes issues des résolutions natives des satellites et d'hybridation des données issues

d'autres capteurs et de différentes sources. Cette hybridation permet d'augmenter les possibilités d'analyse des sites observés, en combinant, par exemple, des images optiques de très haute résolution avec les technologies InSAR pour une observabilité tout temps.

Aussi, l'intégration croissante de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique dans le traitement des données satellitaires transforme radicalement la capacité à extraire des informations pertinentes et à détecter des anomalies. Des algorithmes d'IA comme le Deep Learning (Apprentissage profond) peuvent identifier des « patterns » complexes dans les données, facilitant la classification automatique des objets dans les images. Cette capacité à traiter et analyser rapidement de grandes quantités de données satellitaires ouvre de nouvelles perspectives pour la surveillance des infrastructures critiques, leur déploiement et leur maintenance, associés au suivi des risques naturels. Ces nouvelles performances vont repousser les limites de détections et d'analyses et accélérer l'exploration de nouveaux cas d'usage.

Les perspectives sont donc favorables pour le secteur de l'énergie et particulièrement pour les réseaux électriques où le nombre d'équipements et d'infrastructures peuvent se chiffrer en millions sur de vastes étendues à l'échelle d'un seul pays ou même d'une seule compagnie, d'autant que les infrastructures réseaux sont vieillissantes dans de nombreux pays, devant supporter d'une part, l'extension du réseau, et d'autre part l'insertion des centrales d'énergie renouvelables (photovoltaïque et éolien).



09

---

# Conclusion

**L**es données et images satellites représentent un outil puissant et en évolution pour le secteur des réseaux électriques. Leurs capacités à fournir des informations détaillées et à grande échelle sur les infrastructures électriques offre des avantages considérables pour leur planification, surveillance et maintenance.

Bien que certaines limites soient encore bien présentes, telles que la difficulté à identifier et discerner en optique les infrastructures trop petites ou les anomalies au sein des réseaux (pylônes MT, lignes, une partie de la HT, proximité végétation...), les réseaux électriques, avec des actifs qui se comptent en centaines de milliers d'unités (kms de lignes, équipements, postes, centrales, etc.), sont de bons candidats à une surveillance précise, régulière sur de vastes zones par satellites.

Les défis sont aujourd'hui souvent liés au bon arbitrage économique entre un niveau de précision suffisant grâce à des résolutions et des fréquences de visites moyennes à coût faible et des données de très haute résolution avec des traitements pointus pour de meilleurs résultats en termes de détection et de couverture géographique. Cependant la dynamique du secteur tend vers de meilleurs résultats pour un coût identique.

Le secteur est donc très actif avec un nombre important de grandes entreprises industrielles, informatiques et de start-ups qui se positionnent pour adresser un large spectre d'applications en réponse aux besoins des compagnies du secteur électrique et énergétique.

On observe également, de nombreux partenariats commerciaux ou de recherches entre les compagnies d'électricité, des start-ups, industriels et acteurs du domaine spatial pour tester des applications et des cas d'usage. Le programme Digital Energy, financé par l'Union européenne et mis en œuvre par l'Agence française de développement, qui identifie et accompagne les solutions digitales et innovantes pour le secteur énergétique, témoigne du foisonnement du secteur avec plusieurs cas d'usage illustrés dans cette étude (détection d'infrastructures ligne, gestion de la végétation, évaluation du niveau d'électrification, etc.).

On pourra également citer les « Challenges Copernicus » gérés par le CNES et Aerospace Valley et ses projets collaboratifs avec RWE (Implantation optimale de l'éolien en mer et RTE (gestion de la végétation) ou le partenariat entre Planet Labs et PG&E (gestion de la végétation et risques d'incendie).

Les progrès rapides des technologies satellitaires, avec le lancement de nouvelles constellations, l'amélioration des capteurs et des traitements embarqués, ainsi que la disponibilité d'images en très haute résolution native, ouvrent de nouvelles perspectives pour la surveillance des équipements critiques, des grands réseaux de transmission et de distribution, ainsi que des centrales d'énergie renouvelable. L'intégration de l'intelligence

artificielle et la combinaison avec d'autres sources de données dans le traitement des images renforcent encore ces capacités.

Bien que la surveillance en temps réel (d'une précision de quelques heures) des conditions opérationnelles et des incidents sur les infrastructures ne soit pas encore totalement réalisable, le marché se rapproche de cet objectif. Les nouvelles constellations, telles que Pléiades Neo d'Airbus, WorldView-Legion, le programme COD3 du CNES, ainsi que les constellations SAR d'ICEYE et Capella Space, offriront des résolutions de quelques dizaines de centimètres, plusieurs visites par jour, des images en 3D et des capacités de surveillance par tous les temps grâce aux technologies SAR. Ces avancées permettront également la détection de mouvements millimétriques, améliorant considérablement la gestion et la maintenance des infrastructures critiques.

La mise à disposition de toutes ces données, plus précises et plus rapides, va accélérer les développements de traitement numérique de l'imagerie pour les fournisseurs de services d'intelligence de l'imagerie et faire évoluer les plateformes digitales actuelles de gestion des infrastructures et de leur maintenance au sein même des compagnies. Ces plateformes devront s'adapter avec des capacités supérieures en termes de quantité de données, d'actifs, de composants, de modélisations à traiter en temps réel, pour gérer efficacement ces nouvelles masses d'informations. Les compagnies cherchent déjà à mettre en place différents types de jumeaux numériques (Digital Twin) des réseaux, comme les jumeaux numériques de l'état de la situation environnementale, du prévisionnel de production et de l'état de santé des réseaux pour l'optimisation des opérations et de la maintenance.

Les technologies d'intelligence artificielle et d'automatisation, telles que la détection et la caractérisation automatique des actifs et de leur état, vont apporter une aide précieuse. Cependant, pour être pleinement efficaces, les outils et les plateformes devront améliorer leur scalabilité et surtout leur facilité d'utilisation. Cela permettra aux équipes d'étude et de planification, à celles d'exploitation et de maintenance, ainsi qu'aux gestionnaires d'infrastructures, de tirer pleinement parti de ces technologies avancées.

# 10

---

## Bibliographie

**L**a recherche bibliographique s'appuie principalement sur les recherches internet mettant à disposition les articles sur les sujets retenus, les présentations de solutions sur les sites web et brochures des acteurs technologiques (entreprises, start-up), les présentations de projets issus des programmes institutionnels, les documents collectés auprès des acteurs interrogés.

## Bibliographies

- «EGMS: A general introduction» - D<sup>r</sup> Renalt Capes - 2<sup>nd</sup> March 2023
- « Auscultation par satellite pour la surveillance des ouvrages : application de la méthode d'interférométrie radar satellitaire pour la modélisation, la surveillance et la détection d'anomalies » - Guillaume Hochard, Fabien Ranvier - soldata
- « UCS-Satellite-Database 5-1-2023 » - Union of Concerned Scientist
- « Vers une gestion favorable à la biodiversité sous les lignes haute tension » - Sciences Eaux & Territoires n°25 – 2018 – Jean-François GODEAU - Ecofirst s.c.r.l. Jean-François LESIGNE - Attaché environnement à RTE
- « Amélioration des résolutions spatiale et spectrale d'images satellitaires par réseaux antagonistes » - Anaïs GASTINEAU - Thèse 2021 - Université de Bordeaux
- «EUSPA EO and GNSS Market Report» - European Union Agency for the Space Programme (EUSPA), 2024 issue 2
- [https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/202207/CAMS\\_Wilfire%20Wrap%20Up\\_05.07.2022\\_Final\\_France.pdf](https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/202207/CAMS_Wilfire%20Wrap%20Up_05.07.2022_Final_France.pdf)

## Lien utiles

- [www.copernicus.eu/fr](http://www.copernicus.eu/fr)
- [dynamis.data-terra.org](http://dynamis.data-terra.org)
- [www.connectbycnes.fr/challenges-copernicus-2023](http://www.connectbycnes.fr/challenges-copernicus-2023)
- <https://egms.land.copernicus.eu/>
- [www.spaceclimateobservatory.org](http://www.spaceclimateobservatory.org)
- <https://sentinel.esa.int>
- [www.geosophy.io/](http://www.geosophy.io/)

- <https://pleiades.cnes.fr>
- [www.aerospace-valley.com/](http://www.aerospace-valley.com/)
- [www.planet.com/pulse/planet-introduces-new-high-resolution-pelican-satellites-and-fusion-with-sar/](http://www.planet.com/pulse/planet-introduces-new-high-resolution-pelican-satellites-and-fusion-with-sar/) (Garde Feu Canada)
- [Union of Concerned Scientists](#) (record of the operational satellites)
- <http://geo-entreprises.afigeo.asso.fr/> (l'annuaire des géo-entreprises de l'Afigeo.)
- <https://maxar.com/>
- [www.igo.fr/igoglobbe-cloud3d/](http://www.igo.fr/igoglobbe-cloud3d/)
- <https://earth.esa.int/eogateway/catalog>
- [www.esrifrance.fr/contenus-services-en-ligne.aspx](http://www.esrifrance.fr/contenus-services-en-ligne.aspx)
- [www.pixalytics.com/category/earth-observation/](http://www.pixalytics.com/category/earth-observation/)
- [www.ge.com/digital/applications/smallworld-gis-geospatial-asset-management](http://www.ge.com/digital/applications/smallworld-gis-geospatial-asset-management)
- [www.kineis.com/en/kineis-iot-everywhere/](http://www.kineis.com/en/kineis-iot-everywhere/)
- <https://swarm.space/>
- <https://energies-and-infrastructures-monitoring.groupcls.com>
- [www.eoportal.org](http://www.eoportal.org)
- [www.applisat.fr](http://www.applisat.fr)

# II

---

## Programmes satellites **et de** **services**



## SCO: Space for Climate Observatory

[www.spaceclimateobservatory.org](http://www.spaceclimateobservatory.org)

Le *Space for Climate Observatory* (Observatoire spatial pour le climat), est une initiative internationale née en 2019 et regroupant un ensemble d'entités publiques et privées impliquées dans le secteur de l'observation de la Terre (OT).

Exemple : Le projet **Thermocity**, consiste à étudier les îlots de chaleur urbaine et les déperditions thermiques à partir d'un outil d'analyse de la thermographie urbaine basé sur de l'image satellite.

## Programme Copernicus

[www.copernicus.eu/fr](http://www.copernicus.eu/fr)

Le programme Copernicus, piloté par l'Union européenne en partenariat avec l'Agence spatiale européenne (ESA), représente l'initiative la plus ambitieuse en matière d'observation de la Terre à ce jour. Conçu pour fournir des données précises et à jour sur l'environnement terrestre, il sert une variété d'applications allant de la surveillance du climat à la gestion des catastrophes naturelles. Grâce à une constellation de satellites Sentinel, Copernicus offre une vue sans précédent sur notre planète, contribuant ainsi à la protection de l'environnement, à la gestion des ressources et à la sécurité des citoyens européens. Sa richesse de données est accessible gratuitement, favorisant l'innovation et soutenant la politique environnementale européenne. Ce programme marque un tournant dans la manière dont nous observons et comprenons notre planète, soulignant l'engagement de l'Europe envers la durabilité et la préservation de l'environnement.

## European Ground Motion Service

Copernicus EGMS – (Service Européen de surveillance des mouvements du sol) est un service opérationnel de surveillance des mouvements lents du sol à partir de l'InSAR Sentinel-1, mis en place depuis 2022, il offre une précision millimétrique inédite qui enrichira les analyses de ces mouvements. Le Bureau de recherche géologique et minière (BRGM – en France) a participé à la validation d'EGMS en 2022 et réalise des projets liés aux politiques publiques de gestion des risques : éruptions volcaniques, séismes, vulnérabilité du littoral aux impacts climatiques, mouvements et glissements de terrains. Ces phénomènes peuvent être étudiés grâce à des données satellitaires qui permettent de réaliser des cartes d'aleas ou d'alimenter des modélisations. Le BRGM utilise par exemple l'imagerie satellitaire optique (Sentinel- 2 Copernicus, SPOT, Pléiades) pour estimer la bathymétrie côtière (relief sous-marin). Le BRGM utilise également l'analyse interférométrique des images radar (notamment Sentinel 1) pour le suivi des mouve-

ments de terrain associés à de nombreux types de risques (subsidence minière, retrait ou gonflement des argiles).

Il est probable que les résultats de ces programmes seront très utiles aux réseaux d'énergie pour la surveillance des abords et des sols des infrastructures.

## Programme CO3D

Les quatre satellites CO3D (Constellation Optique en 3D) sont de petits satellites qui vont cartographier le globe en 3D depuis l'orbite terrestre basse à partir de 2025. Ils répondront aux besoins des secteurs public et privé.

Pour prendre la relève des services stéréoscopiques, (images en relief 3D), fournis par les satellites Pléiades, le CNES a mis en place le programme CO3D, qui a pour but de fournir des données géographiques globales en 3 dimensions. En survolant la même zone à différentes inclinaisons, il est possible de générer à partir des images acquises sur cette zone une cartographie 3D. C'est ce qui explique le besoin de quatre satellites pour pouvoir acquérir rapidement les images et suivre de potentielles évolutions.

Chaque satellite CO3D sera équipé d'un instrument optique unique, d'une résolution spatiale de 50cm dans les bandes visibles rouge, vert, bleu et proche infrarouge. Après traitement spécifique au sol des résultats, ils fourniront des cartes 3D de toutes les terres émergées du globe, appelées MNS (Modèle Numérique de Surface) avec une résolution altimétrique d'un mètre environ. Les MNS produits représenteront environ 25 millions de km<sup>2</sup> chaque année, une cadence unique au monde avec une telle précision : ils seront utilisés par la défense, la société civile mais devraient également générer de nouvelles perspectives pour des start-up ou des entreprises installées qui les exploiteront de façon commerciale. Le globe entier devrait être couvert en 5 ans, et selon les besoins de certains utilisateurs spécifiques (glaciologues, nivologues, géologues, etc.) certaines zones seront remodelisées plusieurs fois par an.

## Programme LiDAR HD IGN

Le programme **LiDAR HD de l'IGN**, mené entre 2021 et 2025, réalisera et diffusera une cartographie 3D de l'intégralité du sol et du sursol de la France en données LIDAR avec une résolution moyenne de 10 points/m<sup>2</sup>. L'acquisition des données sera réalisée par un LiDAR embarqué sur hélicoptère au terme d'un plan de 7000 heures de vols. Les données seront accessibles en open data. Les données LiDAR HD sont intégrées dans les SIG (type ArcGIS) et viennent compléter les données satellitaires.

Ce programme répond aux besoins d'observation et d'analyse spatiale dans de nom-

breux domaines de l'action publique (prévention des risques, observation de la ressource forestière, aménagement du territoire...) et constitue un levier pour le développement de futurs services à valeur ajoutée. Le secteur énergie devrait profiter de ces données. Des start-ups comme Tucoenergie ; ou Cythelia Energy en partenariat avec l'IGN développent actuellement des applications pour l'analyse du potentiel solaire en fonction des données 3D des toits et de la topographie.

# 12

---

**Fournisseurs de  
données satellitaires**

## 01. Planet Labs

Planet Labs, souvent appelé Planet, est une entreprise américaine dans le domaine de l'aérospatial et du traitement des données, qui opère une flotte de satellites pour fournir des données et des images de la Terre en quasi-temps réel. Avec sa constellation de plus de 150 satellites, principalement des CubeSats appelés Doves, Planet est capable d'offrir une couverture quotidienne globale de la surface terrestre, ce qui marque une révolution dans l'accès aux données d'observation de la Terre. Ces informations sont cruciales pour diverses applications, allant de l'agriculture de précision, à la surveillance environnementale, en passant par la gestion des catastrophes naturelles et l'urbanisme. Le site d'information de Planet met à disposition des utilisateurs une interface intuitive pour accéder à des images satellites à haute résolution, facilitant ainsi la prise de décision basée sur des données précises et actualisées.

La nouvelle constellation PELICAN de Planet pour l'observation de la Terre, conçue pour capturer les changements en temps réel, comprendra 32 satellites et permettra des images de résolution optique de 30 cm qui seront fusionnées avec des images SAR.

## 02. Google

Google utilise les images de Maxar Technologies pour alimenter certaines des données visuelles de Google Earth et Google Maps.

L'accès aux images de Maxar pour des entreprises et des organisations se fait généralement sur une base commerciale, ce qui signifie que l'utilisation de ces images pour des projets spécifiques ou des applications professionnelles peut nécessiter l'achat de licences d'utilisation. Maxar propose une gamme de produits et services d'imagerie, et les coûts peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la résolution des images, l'étendue géographique couverte, et le type d'utilisation (commerciale, gouvernementale, éducative, etc.).

Pour les utilisateurs individuels, l'accès à des images via des plateformes publiques comme Google Earth ou Google Maps est gratuit. Ces services permettent au grand public de visualiser des images satellite de haute qualité sans frais, mais l'utilisation de ces images à des fins commerciales ou la redistribution nécessite généralement une licence appropriée.

Les entreprises et les organisations intéressées par l'utilisation des images satellite de Maxar pour leurs projets doivent contacter directement Maxar ou passer par leurs canaux de vente pour obtenir des informations sur les licences et les coûts associés. Google combine des données provenant de diverses sources pour créer les images dé-

taillées et les cartes que nous voyons sur Google Maps et Google Earth. Ce processus implique l'intégration d'images satellite, de photographies aériennes, de modèles 3D, et d'autres données géospatiales pour fournir une vue complète et à jour de la surface de la Terre. Voici un aperçu général de comment Google traite et combine ces données :

## Acquisition des données

Images satellite : Google acquiert des images satellite haute résolution de fournisseurs comme Maxar Technologies (anciennement DigitalGlobe) ; qui capturent des images de la Terre depuis l'espace.

- **Photographies aériennes** : Google utilise également des photographies prises depuis des avions, qui offrent une résolution plus élevée que les images satellite pour certaines régions.
- **Street View et Images à 360 Degrés** : pour les vues au niveau de la rue, Google utilise des voitures, des tricycles, et même des sacs à dos équipés de caméras pour capturer des images panoramiques à 360 degrés.

## Traitement des images

- **Superposition et assemblage** : Les images satellite et aériennes sont superposées et assemblées pour créer une carte continue. Cela implique d'ajuster les couleurs, les contrastes, et de corriger les distorsions pour que les images de différentes sources s'alignent correctement.
- **Correction géométrique** : Pour s'assurer que les images correspondent précisément à leur emplacement géographique sur la terre, Google effectue des corrections géométriques en utilisant des points de repère connus et des données GPS.
- **Mise à jour et maintenance** : Les images sont régulièrement mises à jour pour refléter les changements dans l'environnement construit et naturel. Google utilise des algorithmes pour détecter les zones nécessitant des mises à jour prioritaires.

## Création de modèles 3D

- **Photogrammétrie** : pour les bâtiments et les structures en 3D, Google utilise la photogrammétrie, une technique qui reconstruit des objets tridimensionnels à partir de photographies prises sous différents angles.
- **Intégration des données LiDAR** : dans certains cas, les données LiDAR (Light Detection and Ranging) sont également utilisées pour créer des modèles 3D précis du terrain et des caractéristiques géographiques.

## 03. ICEYE

ICEYE est une entreprise finlandaise qui a déployé plus d'une dizaine de satellites SAR en orbite avec l'ambition de continuer à étendre sa constellation pour améliorer la couverture globale et la fréquence de revisite. Cependant, le nombre exact de satellites en fonctionnement peut évoluer rapidement en raison de nouveaux lancements et de la mise à jour de leur constellation. ICEYE vise à créer une capacité de surveillance de la Terre sans précédent, offrant des images radar fréquentes et de haute résolution pour diverses applications à travers le monde.



# 13

---

## Annexes

# 01. Glossaire

- **AI (Artificial Intelligence)** : Intelligence Artificielle. Ensemble de théories et de techniques mises en œuvre pour créer des machines capables de simuler l'intelligence humaine.
- **Digital Twin : Jumeau Numérique**. Un jumeau numérique est une réplique virtuelle d'un objet, d'un processus ou d'un système qui peut être utilisé pour la simulation, l'analyse et le contrôle à partir d'informations du terrain en temps réel et de calculs de modélisations. Dans le contexte des réseaux électriques, un jumeau numérique peut représenter une infrastructure physique telle qu'une centrale électrique, une ligne de transmission, ou un réseau de distribution complet.
- **EO (Earth Observation)** : Observation de la Terre. Surveillance de la planète pour recueillir des informations concernant ses systèmes physiques, chimiques et biologiques via des satellites.
- **GIS (Geographic Information System) ou SIG (Système d'information géographique)** : Système conçu pour capturer, stocker, manipuler, analyser, gérer et présenter spatialement toutes sortes de données géographiques.
- **GNSS (Global Navigation Satellite System)** : Système de Navigation par Satellite Global. Un système qui fournit des services de géolocalisation et de temps à un récepteur GNSS n'importe où sur la Terre.
- **GPS (Global Positioning System)** : Système de positionnement global. Système de navigation par satellite des États-Unis qui fournit des informations de géolocalisation et de temps à un récepteur GNSS n'importe où sur la Terre.
- **HT (Haute Tension)** : Niveaux de tension électrique généralement supérieurs à 36 kilovolts (kV). Les lignes de haute tension sont utilisées pour la transmission d'électricité sur de longues distances, de la centrale de production aux sous-stations de distribution.
- **InSAR (Interferometric SAR)** : Interférométrie SAR. Technique utilisant deux ou plusieurs images SAR pour créer des cartes de déplacement ou de topographie.
- **LIDAR (Light Detection and Ranging)** : Détection et télémétrie par la lumière. Technologie de télédétection qui mesure la distance à un objet en illuminant la cible avec un laser et en analysant la lumière réfléchie.

- **LEO (Low Earth Orbit)** : Orbite terrestre basse. Orbite autour de la Terre à une altitude de 160 à 2 000 kilomètres, utilisée par la majorité des satellites d'observation de la Terre pour une meilleure résolution d'image.
- **MEO (Medium Earth Orbit)** : Orbite terrestre moyenne. Région de l'espace autour de la Terre située au-dessus de l'orbite terrestre basse (LEO) et en dessous de l'orbite géosynchrone. Les satellites en MEO, typiquement situés entre 2 000 et 35 786 kilomètres d'altitude, sont souvent utilisés pour la navigation et les communications globales, comme ceux du système GPS.
- **Mini-grids et Micro-grids** : Appelés aussi mini-réseau en français, est un réseau électrique de petite taille, généralement alimenté par une combinaison de groupe diesel et de batteries de stockage et de sources renouvelables (principalement photovoltaïques). Ces réseaux fonctionnent généralement en autonome mais peuvent être connectés au réseau électrique principal. Ils desservent des communautés entières, des secteurs spécifiques comme des hôpitaux, des universités ou des installations industrielles)
- **M/L (Machine Learning)** : Apprentissage automatique. Branche de l'intelligence artificielle qui permet à un système d'apprendre et de s'améliorer à partir de données sans être explicitement programmé pour certaines tâches.
- **MT (Moyenne Tension)** : Niveau de tension électrique utilisé dans la distribution d'électricité, généralement compris entre 6kV et 36 kV.
- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)** : Indice de végétation par différence normalisée. Un indice calculé à partir des images satellite visant à estimer la densité et la santé de la végétation.
- **NTLI (Night Time Light Intensity)** : Analyse de l'intensité lumineuse en période nocturne.
- **OT** : Observation de la terre
- **Panchromatic** : Panchromatique. Se réfère à un type d'image satellite ou photographique qui capture la lumière visible dans une large bande de longueurs d'ondes en une seule couche, produisant des images en noir et blanc de haute résolution. Les capteurs panchromatiques sont utilisés pour obtenir des détails fins de la surface terrestre, et peuvent être combinés avec des images multispectrales pour augmenter la résolution spatiale des images couleur.

- **SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)** : Indice de fréquence d'interruption moyenne du système : (fréquence moyenne des interruptions d'alimentation par client)
- **SAIDI (System Average Interruption Duration Index)** : Indice de durée moyenne d'interruption du système : (durée moyenne d'interruption de l'alimentation électrique, indiqué en minutes par client).
- **SWIR (Short-Wave Infrared)** : font partie du spectre électromagnétique, situées entre les bandes de l'infrarouge proche (NIR) et de l'infrarouge moyen (MIR)
- **VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)** : Suite de radiomètres pour imageurs dans l'infrarouge et le visible Utilisé à grande échelle pour cartographier l'intensité et la pollution lumineuse.

## 02. Annexes

Les principaux avantages, limites et perspectives évoqués lors des entretiens initiaux avec les sociétés sollicitées sont rappelés et sont résumés ainsi :

### Usages et avantages principaux des données satellitaires

- Améliorer la qualité des visualisations, l'automatisation des détections et du géoréférencement des infrastructures (lignes, pylônes, ...) dans les plateformes de type SIG (Système d'Information Géographique, Asset Performance Management) ou autres systèmes dédiés.
- Aider les phases d'études, de modélisation, de planification, de déploiement et d'exploitation des infrastructures et réseaux
- Faciliter la maintenance et les interventions des équipes opérationnelles sur le terrain
- Améliorer et accélérer la caractérisation de leur environnement (terrains, végétation, bâtis)
- Évaluer les risques climatiques et leur impacts (tempêtes, inondations, feux...)
- Améliorer les prévisions de production d'énergie renouvelables.

### Les limites identifiées

- Les résolutions de quelques mètres limitent les détections des infrastructures électriques de faible taille notamment en distribution.

- Les fréquences de revisite des satellites (1 à plusieurs jours) qui réduisent les champs d'applications d'analyse en temps court pour la détection des incidents au niveau des infrastructures et de leurs environnants.
- Les coûts pouvant devenir élevés ou peu pertinents pour des grandes zones peu denses nécessitant des résolutions infra-mètre.
- Les besoins de photos aériennes, radar, inspection terrains et capteurs qui restent encore indispensables et coûteuses pour obtenir les précisions nécessaires.

## Les perspectives

En termes d'applications

- Meilleure observabilité de l'état des infrastructures (Précision et fréquence de suivi)
- Envisager la détection d'anomalies opérationnelles au niveau du réseau (exemple point chaud, affaissement de ligne, etc.).
- Améliorer la précision du suivi des emprises de la végétation autour des infrastructures.
- Améliorer l'observation des intensités lumineuses et la corrélation avec les raccordements et les zones d'accès à l'énergie électrique.
- Améliorer l'élaboration de Jumeaux numériques temps réel de l'état des infrastructures.

Grâce à de nouvelles technologies et services comme :

- Améliorations des résolutions infra-mètre, infrarouge, radar, en rapport avec des cycles de revisite plus courts.
- Renforcement des capacités d'analyses multi-secteurs (social, production, climatique, environnements), multi-sources de données (photo, satellites, IoT, systèmes externes), avec l'apport massif de l'IA (Intelligence Artificielle), automatisation des détections et des caractérisations des actifs.

## À propos du groupe AFD

Le groupe AFD contribue à mettre en œuvre la politique de la France en matière de développement durable et de solidarité internationale. Composé de l'Agence française de développement (AFD), en charge du financement du secteur public et des ONG, de la recherche et de la formation; de sa filiale Proparco, dédiée au financement et à l'accompagnement du secteur privé; et d'Expertise France, agence de coopération technique, le Groupe finance, accompagne et accélère les transitions nécessaires pour un monde plus juste et résilient.

C'est avec et pour les populations que nous construisons en lien avec nos partenaires des solutions partagées dans plus de 150 pays, ainsi que dans 11 départements et territoires ultramarins français. Notre objectif ? Concilier développement économique et préservation des biens communs : le climat, la biodiversité, la paix, l'égalité femmes-hommes, l'éducation ou encore la santé. Nos équipes sont engagées dans 4 200 projets sur le terrain, contribuant ainsi à l'engagement de la France et des Français en faveur des Objectifs de développement durable (ODD). Pour un monde en commun.

**Pour plus d'information visitez**

[www.afd.fr](http://www.afd.fr)

