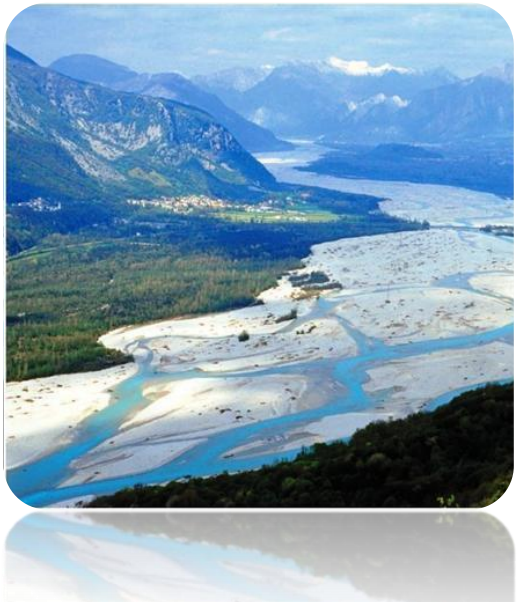
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES



Inventaire de l'Etat de l'art des applications et services spatiaux pour la gestion de l'eau

CATALOGUE DES FICHES TECHNO

ARTELIA

CLS
COLLECTE LOCALISATION SATELLITES

ALCIMED

DATE : SEPTEMBRE 2013 **REF : 8410185**

Numéro de version V2

Table des matières

1. PLUVIOMETRIE 4
1.1. DEFINITION 4
1.2. UTILISATIONS 4
1.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 4
1.4. ACCES AUX DONNEES 5
1.5. PLUVIOMETRIE OBTENUE PAR RADIOMETRIE VIS/R 6
2. EVAPORATION ET EVAPOTRANSPIRATION 7
2.1. DEFINITION 7
2.2. UTILISATIONS 7
2.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 7
2.4. LIMITATIONS ET CONTRAINTES 7
3. NIVEAU D'EAU 8
3.1. DEFINITION 8
3.2. UTILISATIONS 8
3.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 8
3.4. NIVEAU D'EAU DES GRANDS FLEUVES 9
3.5. NIVEAU D'EAU DES LACS 11
4. VITESSE DE COURANT DE SURFACE 13
4.1. DEFINITION 13
4.2. UTILISATIONS 13
4.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 13
5. DEBIT 13
5.1. DEFINITION 13
5.2. UTILISATIONS 14
5.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 14
5.4. DEBIT PAR TARAGE ET HAUTEURS ALTIMETRIQUES 14
6. STOCK EN EAU SOUTERRAINE 17
6.1. DEFINITION 17
6.2. UTILISATIONS 17
6.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 17
6.4. STOCK D'EAU SOUTERRAINE PAR GRAVIMETRIE 17
7. HUMIDITE DE SURFACE DU SOL 19
7.1. DEFINITION 19
7.2. UTILISATIONS 19
7.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 19
7.4. HUMIDITE DE SURFACE DU SOL PAR IMAGERIE SAR (INDICE) 20
7.5. HUMIDITE DE SURFACE DU SOL PAR DIFFUSIOMETRE RADAR (INDICE) 23
7.6. HUMIDITE DU SOL PAR RADIOMETRIE MICRO-ONDES 25
8. DEBIT DES FONTES DE NEIGE OU DE GLACE 27
8.1. DEFINITION 27
8.2. UTILISATIONS 27
8.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 27

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

8.4. DEBIT DES FONTES DE NEIGE OU DE GLACE EN ZONE MONTAGNEUSE PAR BASSIN VERSANT 28
9. QUALITE DE L'EAU (TURBIDITE, COULEUR DE L'EAU, MATIERE EN SUSPENSION TOTALE) 30
9.1. DEFINITION 30
9.2. UTILISATIONS 30
9.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 30
9.4. QUALITE DE L'EAU PAR IMAGERIE VIS/NIR 30
10. TEMPERATURE DES EAUX DE SURFACE 32
10.1. DEFINITION 32
10.2. UTILISATIONS 32
10.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 32
10.4. TEMPERATURE DE SURFACE DE L'EAU PAR RADIOMETRE INFRAROUGE THERMIQUE 32
11. VENT DE SURFACE 34
11.1. DEFINITION 34
11.2. UTILISATIONS 34
11.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 34
11.4. VENT DE SURFACE PAR RADAR IMAGEUR SAR 34
12. CARTOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS 36
12.1. DEFINITION 36
12.2. UTILISATIONS 36
12.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 36
12.4. CARTOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS PAR IMAGEUR OPTIQUE HR 36
12.5. CARTOGRAPHIE DES ETENDUES D'EAU PAR IMAGERIE SAR 38
12.6. OCCUPATION DU SOL DES BASSINS VERSANTS PAR IMAGEUR OPTIQUE 40
13. TOPOGRAPHIE ET BATHYMETRIE 41
13.1. DEFINITIONS 41
13.2. UTILISATION 41
13.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 41
13.4. TOPOGRAPHIE PAR IMAGEUR OPTIQUE HAUTE-RESOLUTION 41
13.5. BATHYMETRIE PAR IMAGEUR OPTIQUE HAUTE-RESOLUTION 42
14. DEPLACEMENT DES SOLS ET INFRASTRUCTURES 44
14.1. DEFINITION 44
14.2. UTILISATIONS 44
14.3. TECHNOLOGIES SPATIALES 44
14.4. DEPLACEMENTS DES SOLS ET INFRASTRUCTRES PAR RADAR IMAGEUR SAR 44

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

1. PLUVIOMETRIE

1.1. DEFINITION

Le terme « précipitation » désigne des cristaux de glace ou des gouttelettes d'eau qui, ayant été soumis à des processus de condensation et d'agrégation à l'intérieur des nuages, sont devenus trop lourds pour demeurer en suspension dans l'atmosphère et tombent au sol. Les précipitations sont l'élément clé du cycle de l'eau dans sa phase terrestre.

1.2. UTILISATIONS

Une meilleure compréhension de la répartition actuelle des précipitations, et de la façon dont elle pourrait être affectée par le changement climatique, est essentielle pour la prévision précise de la sécheresse ou des inondations régionales.

Les systèmes nuageux et pluvieux, au caractère notablement aléatoire et aux variations rapides, surtout en été dans les régimes de convergences, sont difficiles à quantifier. Les mesures in-situ sont difficiles à obtenir compte tenu la couverture de la Terre à 70% par les océans et du nombre important de pays qui ne sont pas équipés de moyens adéquats et fiables de capteurs de pluie. En conséquence, le satellite est souvent le seul moyen pratique d'obtention de données fiables, régionales et globale, sur les précipitations.

Les niveaux de précipitations sont principalement fournis aujourd'hui (à terre) par des réseaux de mesures in-situ, divers pluviomètres et des radars météorologiques qui délivrent des données en temps réel.

Les informations sur l'eau liquide et le niveau des précipitations issues des satellites sont utilisées par les agences météorologiques pour initialiser les modèles de prévision numérique à des grandes échelles ou pour obtenir des données en mer ou dans les régions peu ou pas instrumentées.

En pratique, les utilisateurs hydrologues travaillent sur les données fournies par les agences météorologiques car la résolution des produits du spatial est le plus souvent insuffisante pour leurs applications. Les résolutions géographiques utiles sont du 1/10ième de la taille du bassin versant étudié. Les résolutions temporelles intéressantes sont, en crue, de l'ordre du temps de concentration du bassin, et pour les études de ressources en eau quotidienne, décadaire voire mensuelle.

Les scientifiques, principalement ceux qui travaillent sur le climat et le cycle de l'eau accèdent aux bases de données d'observation constituées par différentes missions mais il leur faut interpréter et/ou traiter les informations, souvent indirectes, qui sont fournies.

1.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

On distingue quatre types d'instrument embarqué associés aux mesures des précipitations :

- Les radiomètres imageurs multi-spectraux (passifs) en Vis/IR embarqués sur des satellites météorologiques géostationnaires (GOES, GMS, Meteosat) permettent une observation continue de la couverture nuageuse à des résolutions de l'ordre de (voire inférieure à) 5 km. Il est possible d'estimer un taux de pluie directement à partir de ce type de mesure mais la difficulté réside dans la compréhension des mécanismes liant l'observation du sommet des nuages (hauteur, température de brillance) aux précipitations à la surface. Les satellites géostationnaires fournissent aussi des renseignements essentiels sur la localisation de cyclones tropicaux. Des instruments de ce type sont également embarqués sur des satellites à défilement à orbite basse (LEO).

- Les radiomètres imageurs micro-ondes (passifs) fournissent des informations 3D sur la structure des systèmes pluvieux et leurs caractéristiques. Ils permettent d'estimer les taux de pluie avec une meilleure précision mais souffrent d'une résolution spatiale plus faible (de 10 km à 50 km) et d'une couverture temporelle bien moindre étant données les orbites basses (LEO) des satellites défilants qui les embarquent. Ils sont très utiles pour compléter celles des autres instruments et sont largement utilisés en assimilation de données dans les modèles de prévision. Pour exemples, les radiomètres micro-ondes à balayage conique de type SSMI (US), AMSRE (US), MADRAS (France/Inde) effectuent des mesures à incidence constante (environ 55°) sur des zones couvrant 120° à 130° autour de la direction de vol.

- Les sondeurs de température et d'humidité (passifs, IR pour la température, MW pour l'humidité) embarqués le plus souvent sur des LEO réalisent des profils verticaux de température et d'humidité de l'atmosphère. En matière de précipitations, ils présentent les mêmes inconvénients (faibles résolutions spatiale et temporelle) que les instruments précédents. Leurs observations des

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

caractéristiques de l'atmosphère sont cependant largement utilisées dans les modèles de prévision météorologiques.

- Les radars météorologiques font une apparition remarquée sur les satellites. Ils fournissent des profils de nuages et de précipitations de grande qualité (instruments actifs micro-ondes MW, certains disposent en plus des bandes Ka et Ku permettant de classifier les précipitations en pluie et neige). Ils fournissent des informations complémentaires sur les faibles précipitations et également sur les vitesses de sédimentation.

En pratique :

Les produits de taux de pluie disponibles sont en général issus d'une combinaison de plusieurs techniques, parfois complétées de mesures issues de radars dédiés à la précipitation (PR sur TRMM), voire d'un modèle météorologique.

Toutes ces données satellitaires sont assimilées dans les modèles météorologiques et contribuent à améliorer le processus de production de prévisions météorologiques. Ce sont ces dernières données qui sont utilisées par les acteurs de l'eau.

Nous nous contentons de fournir ci-après la fiche produit des radiomètres Vis/IR embarqués sur des satellites géostationnaires car c'est le seul produit susceptible d'être utilisé directement en l'absence de données pertinentes des agences météorologiques.

1.4. ACCES AUX DONNEES

- Les services météorologiques : fournitures de données traitées issues des mesures in-situ et de prévisions issues des modèles. Ces données sont parfois payantes (France), mais sont de bonne facture. Des produits améliorés, comme des champs de pluie spatialisés par interpolation de pluviomètres, parfois corrigés d'observation radar peuvent être fournis.

- La base historique de données globales des moyennes mensuelles des précipitations constituée depuis 1979 dans le cadre de GEWEX Global Precipitation Climatology Project (GPCP) du WRCP de l'Organisation Mondiale de la Météorologie. Une base analogue a été constituée pour les nuages dans le cadre de l'International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP)

- Les sites suivant donnent accès aux données des radiomètres :
    - http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/background.html
    - http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation/additional/instruments/trmm_instr.shtmlhttp://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM_V6.3B42_daily.2.shtml
    - http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=TRMM
    - http://trmm.gsfc.nasa.gov/3b42.html
    - http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/index_e.htm

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

1.5. PLUVIOMETRIE OBTENUE PAR RADIOMETRIE VIS/R

Paramètre	Précipitations
Type de technologie	**Radiométrie VIS/IR sur satellites géostationnaires** **Observation d'un disque terrestre**
Instrument(s) embarqué(s)	Radiomètres imageurs multi-spectraux (passifs) en VIS/IR embarqués sur des satellites météorologiques tels que : GOES (USA), Meteosat (Europe), INSAT (Inde), FY (Chine), COMS (Corée du Sud)…).
Mode de production	Observation d'un disque terrestre toutes les 15 ou 30 minutes. Ils mesurent le rayonnement émis par les constituants de l'atmosphère et par la surface du globe. La mesure radiométrique est appelée température de brillance, elle correspond à la puissance du rayonnement naturel de la scène observée. Les fréquences d'observations se situent dans la gamme 1 GHz à 100 GHz correspondant à des longueurs d'onde de ~0.4 µm (VIS) à 15 µm (TIR). Ces instruments mesurent la couverture nuageuse, la hauteur et la température du sommet des nuages à partir desquelles sont déduits les niveaux des précipitations. Des algorithmes spécifiques sont développés pour chaque instrument.
Maturité	Technologie mature la plus utilisée à ce jour et utilisée depuis de nombreuses années
Perspective	C'est le travail des agences météorologiques d'améliorer et de fournir les bons produits
Automatisation	Produit complexe développé par les agences météorologiques
Données associées	Données météorologiques (modèles)
Domaine d'observation	Couverture spatiale des technologies satellites utilisées (mondiale, globale sans les pôles, régionale, observations sous traces fixes…).
Résolution spatiale	Actuelle : 2.5 km en VIS, 5 Km en IR sur Meteosat 7, 1 km en VIS, 3 km en IR, sur Meteosat 8,9 et 10 (Meteosat 2ème génération ou MSG), 10km sur les GOES Future : 1 km en VIS, 2 km en IR sur les Meteosat 3ième génération (MTG), 0,5 km en VIS et 2 km en IR sur les futurs satellites GOES (R et S) à partir de 2015.
Résolution temporelle	Une mesure toutes les 15 mn avec les satellites MSG au lieu de 30 mn avec les satellites Meteosat 1ère génération :
Format des données	Base de données numériques (NetCDF), cartes de précipitations moyennes (sites de la NOAA)
Accès données	Libre, mais nécessite des traitements complémentaires car le paramètre pluviosité n'est en général pas fourni (température du haut des nuages). Des données traitées sont fournies par les agences météorologiques (NOAA, Eumetsat) http://www.ssd.noaa.gov/PS/PCPN/HE.html http://www.eumetsat.int/Home/Main/DataProducts/Atmosphere/index.htm?l=en
Pérennité des données	Bonne, continuité des satellites américains (GOES), européens (Meteosat), chinois (FY) programmés jusque dans les années 2030
Contraintes à l'utilisation	Deux défis majeurs sont associés à ces technologies. En premier lieu, ces instruments observent des grandeurs indirectes liées aux précipitations. Pour obtenir des meilleures estimations, il est important de développer des algorithmes spécifiques pour chaque instrument. Ensuite, il faut gérer au mieux des jeux de données disponibles en constante évolution à la fois dans l'espace et le temps.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

2. EVAPORATION ET EVAPOTRANSPIRATION

2.1. DEFINITION

L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes.

Elle joue un grand rôle dans les climats et microclimats, notamment en ville. Très difficile à mesurer, c'est la grandeur qui fait généralement défaut pour boucler un bilan hydrologique.

Pour une zone donnée (champ, forêt, région...), on distingue :

- L'évapotranspiration réelle (EtR); c'est l'eau réellement « perdue » sous forme de vapeur (en fait une partie sera recyclée sous forme de rosée ou précipitation)

- L'évapotranspiration potentielle (EtP) ; c'est l'eau susceptible d'être perdue compte tenu des conditions atmosphériques et du sol, dans l'hypothèse où la teneur en eau du sol n'est pas un facteur limitant.

Comme pour la mesure des précipitations, l'unité est le millimètre de hauteur d'eau : 1 mm correspond à 1 litre par mètre carré ou à 10 mètres cube par hectare. Cette quantité d'eau est souvent rapportée à une unité de temps.

L'ETp ou l'évaporation peuvent atteindre 4-6 mm/jour en plein été en zone tempérée européenne et

6-8 mm/jour en zone méditerranéenne.

2.2. UTILISATIONS

Les mesures d'évapotranspiration sont importantes pour comprendre l'influence du couvert végétal sur le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère et pour l'estimation du taux de croissance de la plante.

Les mesures d'évaporation permettent d'estimer les pertes d'eau des réservoirs de surface.

La résolution spatiale idéale (si elle est bien mesurée) serait de 1/10ième de la taille du bassin. La résolution temporelle, pour les études de ressource eau, est quotidienne (petit bassins).

2.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

L'évaporation est fonction des températures relatives du plan d'eau et de l'air, et de l'agitation de surface de ce plan d'eau et donc de la force du vent. Elle est le plus souvent estimée par des mesures in-situ.

La température de surface de l'eau et la vitesse du vent accessibles par mesures satellitaires, pour de grands plans d'eau, (voir fiches température de l'eau et vitesse du vent) et la température de l'air fournie par les agences météorologiques peuvent être utilisées pour estimer le niveau d'évaporation.

L'évapotranspiration potentielle est généralement estimée à partir de données satellitaires en utilisant une gamme de modèles, avec pour entrées des données obtenues à partir des bandes visuelles et thermiques de satellites géostationnaires et de satellites défilants équipés d'instruments comme MODIS, MERIS et des satellites Landsat.

2.4. LIMITATIONS ET CONTRAINTES

L'évaporation et l'évapotranspiration sont des grandeurs très complexes à mesurer. Elles sont généralement obtenues par modélisation, avec de grosses marges d'incertitudes, alors que ce sont des variables clés du cycle de l'eau.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

3. NIVEAU D'EAU

3.1. DEFINITION

La mesure des hauteurs d'eau (limnimétrie) ou de la variation d'un plan d'eau s'effectue généralement de manière discontinue par la lecture d'une règle graduée (échelle limnimétrique) fixée sur un support. Pour connaître en continu les variations d'un plan d'eau, on utilise des limnigraphes qui fournissent sur un support un enregistrement continu des variations du niveau d'eau dans la rivière en fonction du temps

En complément de mesures in-situ, parfois relayées par satellite, des techniques de télédétection prometteuses sont déjà utilisées. Elles sont très attendues dans les pays où la mise en œuvre et la maintenance de réseaux de télémesure sont problématiques.

3.2. UTILISATIONS

- Niveau d'eau pour la navigabilité
- Calcul de débits sur des sections de cours d'eau (La précision souhaitée de la mesure de hauteur est de l'ordre du 1/100 du "marnage" à cette section).
- Gestion des stocks en eau (en particulier gestion des zones transfrontalières : niveaux des lacs amont)
- Suivi des inondations

3.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

- Le radar altimétrique (mesure du temps aller-retour d'un signal radar à pinceau étroit), développé pour l'étude du niveau des océans, est le principal instrument utilisé à terre pour la mesure du niveau des plans d'eau. Il présente l'avantage de fournir des niveaux d'eau avec des périodicités de 10-30 jours et des précisions de 20 cm à 50 cm sur des sections propices : sous trace, 100 m de large au mieux, relief environnant modéré. Ces précisions, utiles pour la navigation sur les grands fleuves, sont jugées encore insuffisantes pour l'estimation des débits mais, en général satisfaisantes, pour l'estimation du niveau de remplissage des lacs. Les performances seront améliorées (AltiKa, Sentinel 3) et les contraintes réduites avec les prochains altimètres.
- GPSP et GPS
- Le premier instrument Lidar (mesure du temps d'aller-retour d'un pinceau laser) embarqué à bord d'un satellite est planifié pour 2016 ICESat-II, le suivant est à l'étude pour 2030. Cette technologie déjà utilisée à terre en station fixe ou en aéroporté.
- Le satellite SWOT, dont le lancement est prévu pour 2020, sera équipé d'un radar à balayage latéral (Wide-swath interferometric, Ka-band altimeter - KaRIN) spécialement conçu pour le suivi des eaux continentales.
- De façon indirecte (voir § contour et surface des plans d'eau), l'imagerie radar et optique fournissent les dimensions des étendues d'eau, les largeurs de fleuves (précisions de quelques mètres). Celles-ci, quand elles sont associées à des modèles numériques de terrain précis peuvent fournir des hauteurs d'eau avec des précisions en général inférieures à celles obtenues par altimétrie.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

3.4. NIVEAU D'EAU DES GRANDS FLEUVES

Paramètre	Niveau d'eau des grands fleuves
Type de technologie	**Altimétrie Radar** **Observation continue au nadir**
Instrument(s) embarqué(s)	Radar altimètre sur les satellites : Passé : ERS (Europe), TOPEX/Poseidon (USA/France), Envisat (Europe)[1], GFO (USA), HY-2A (Chine) Actuel : Jason-1, Jason-2 (USA/France) et SARAL-Altika (Inde/France) ; Cryosat2 (Europe - altimétrie SAR). Futur : Sentinel-3 A& B (Europe), HY-2B (Chine), Jason-3, Jason CS… Lidar, altimétrie laser sur ICESat-2 (USA; 2016) suite à l'expérience ICESat-I Radar interférométrique avec la mission SWOT (USA/France, 2020)
Mode de production	Acquisition de données radar au nadir. Traitement de la donnée dans les segments sols dépendants des agences spatiales. Formatage de la donnée géoréférencée (le long de la trace ou grillée) pour livraison aux utilisateurs finaux.
Maturité	Technologie mature, améliorations à venir sur l'extraction du signal eau sur fleuve plus étroit et plus « bruité » par le relief des berges. Le niveau des océans est l'utilisation actuelle principale de l'altimétrie. La technologie a été étendue aux grands fleuves.
Perspective	Utilisation renforcée sur les fleuves, rivières. Amélioration très significative avec la future mission SWOT
Automatisation	Facilement automatisable quand l'orbite est répétitive (la trace satellite intersecte le plan d'eau toujours au même endroit) et que le contexte d'observation est favorable : section de fleuve assez large et relief des berges modéré. Pour des contextes moins favorables, on doit recourir à une analyse humaine pour affiner les résultats.
Données associées	Aucune, dans les cas simples. Connaissance préalable des niveaux de référence de l'eau, de la topographie.
Domaine d'observation	A ce jour uniquement le long des traces satellites altimètres (pinceau de 5 km au nadir). Pour Jason : entre -66°S et -66°N Pour les autres satellites : couverture quasi globale (quasi couverture des zones Arctique et Antarctique)
Résolution spatiale	Actuelle : Largeur de fleuves 150m au mieux Future : Largeur de fleuves en dessous de 100m (SARAL-AltiKa, Sentinel-3, Jason-3, SWOT…)
Résolution temporelle	Actuelle : 10 à 35 jours suivant la mission altimétrique (sur cycle orbital répétitif) et de l'ordre de quelques jours grâce à la combinaison de satellites sur des sections voisines (le long de la trace, suivant géométries relatives du fleuve et couverture satellite) Future : Idem pour l'altimétrie conventionnelle, fortement dépendant du nombre de missions en service
Précision	Actuelle : Hauteur relative : 10 à 50 cm

[1] ERS, TOPEX/Poseidon, ENVISAT, Jason-1, IceSat sont des missions terminées. Les données d'archive sont disponibles

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

	Future : Hauteur relative : 10 à 30 cm
Format des données	Produits altimétriques « agences » le long de la trace (type GDR), pouvant être dérivé en série temporelles en 1 point spatial Série temporelle de hauteur d'eau déjà calculée (ex : LEGOS/HydroWeb)
Accès données	Accès libre, au moins pour les produits « agences spatiales » (type GDR/IGDR, leur manipulation est complexe) Historique des données : depuis fin 1992 (TOPEX/Poseidon et ERS-1) Sources : agences spatiales, HydroWeb, River & Lake… http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/news-focus/rivers-and-lakes-monitoring-by-altimetry.html http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/ http://earth.esa.int/riverandlake
Pérennité des données	Bonne, instruments en vol jusqu'à 2027
Délais de mise à disposition	Actuels : J+2 (produits type IGDR), mensuel (produits GDR). Des produits altimétriques (OGDR) sont disponibles au bout de quelques heures à l'intention des modélisateurs météo (vents, vagues). Futurs : J+1 (ou mieux à l'exemple des OGDR).
Contraintes à l'utilisation	Variation importante de la largeur du plan d'eau sous la trace entre basses eaux et hautes eaux (mesures plus difficile en basses eaux du fait du rétrécissement du fleuve) Topographie du milieu environnant, relief des berges

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

3.5. NIVEAU D'EAU DES LACS

Paramètre	Niveau d'eau des lacs
Type de technologie	**Altimétrie Radar** **Observation continue au nadir**
Instrument(s) embarqué(s)	Radar altimètre sur les satellites : Passé : ERS (Europe), TOPEX/Poseidon (USA/France), Envisat (Europe)[2], GFO (USA), HY-2A (Chine) Actuel : Jason-1, Jason-2 (USA/France) et SARAL-Altika (Inde/France) ; Cryosat2 (Europe - altimétrie SAR). Futur : Sentinel-3 A& B (Europe), HY-2B (Chine), Jason-3, Jason CS… Lidar, altimétrie laser sur ICESat-2 (USA; 2016) suite à l'expérience ICESat-I Radar interférométrique avec la mission SWOT (USA/France, 2020)
Mode de production	Acquisition de données radar au nadir. Traitement de la donnée dans les segments sols dépendants des agences spatiales. Formatage de la donnée géoréférencée (le long de la trace ou grillée) pour livraison aux utilisateurs finaux.
Maturité	Technologie mature, améliorations à venir sur l'extraction du signal eau sur plan d'eau plus petit et plus « bruité » par le relief des berges. Le niveau des océans est l'utilisation actuelle principale de l'altimétrie. La technologie a été étendue aux lacs.
Perspective	Utilisation renforcée sur les lacs voire forêts inondées et mangroves. Amélioration très significative avec la mission future SWOT
Automatisation	Facilement automatisable quand l'orbite est répétitive (la trace satellite intersecte le plan d'eau toujours au même endroit) et que le contexte d'observation est favorable : section de lac assez large et relief des berges modéré. Pour des contextes moins favorables, on doit recourir à une analyse humaine pour affiner les résultats
Données associées	Aucune, dans les cas simples. Connaissance préalable des niveaux de référence de l'eau, de la topographie.
Domaine d'observation	Mondial, sous les traces des satellites (pinceau de 5 km au nadir).
Résolution spatiale	Actuelle : Dimension de lacs 150m au mieux, si localisé sous trace au sol Future : Dimension de lacs en dessous de 100m (SARAL-AltiKa, Sentinel-3, Jason-3, SWOT…)
Résolution temporelle	Actuelle : 10 à 35 jours suivant la mission altimétrique (sur cycle orbital répétitif), de l'ordre de quelques jours grâce à la combinaison de satellites sur des sections voisines (le long de la trace, suivant géométries relatives du lac et couverture satellite) Future : Idem pour l'altimétrie conventionnelle, fortement dépendant du nombre de missions en service
Précision	Actuelle : Hauteur relative : 5 à 30 cm (plan d'eau plus important que largeur fleuve, eau plus immobile) en précision verticale et mesures à 20Hz, soit 1 mesure tous les 300 m le long des traces

[2] ERS, TOPEX/Poseidon, ENVISAT, Jason-1, IceSat sont des missions terminées. Les données d'archive sont disponibles

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

	Future : Hauteur relative : 5 à 30 cm en précision verticale et mesures à 40Hz pour AltiKa par exemple, soit 1 mesure tous les 170 m le long des traces
Format des données	Produits altimétriques « agences » le long de la trace (type GDR), pouvant être dérivé en série temporelles en 1 point spatial Série temporelle de hauteur d'eau déjà calculée (ex : LEGOS/HydroWeb)
Accès données	Accès libre, au moins pour les produits type GDR/IGDR Historique des données : depuis fin 1992 (TOPEX/Poseidon et ERS-1) Sources : agences spatiales, HydroWeb, River & Lake… http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/news-focus/rivers-and-lakes-monitoring-by-altimetry.html http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/ http://earth.esa.int/riverandlake
Pérennité des données	Bonne, instruments en vol jusqu'à 2027
Délais de mise à disposition	Actuels : J+2 (produits type IGDR), mensuel (produits GDR). Des produits altimétriques (OGDR, vents, vagues) sont disponibles au bout de quelques heures à l'intention des modélisateurs météo. Futurs : J+1 (ou mieux à l'exemple des OGDR).
Contraintes à l'utilisation	Topographie du milieu environnant, relief des berges Iles émergées, bancs de sable émergeants Variation importante des dimensions du lac sous les traces des satellites entre basses eaux et hautes eaux Echos parasites sur berge très urbanisées

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

4. VITESSE DE COURANT DE SURFACE

4.1. DEFINITION

La vitesse de courant d'un liquide ou d'un fluide mesure le mouvement de ce liquide ou de ce fluide. Plus spécifiquement pour l'eau, elle donne une indication sur le mouvement de cette masse d'eau.

4.2. UTILISATIONS

- Estimations des écoulements des surfaces libres
- Navigation
- Estimation des zones à risques pendant les inondations
- Monitoring des écosystèmes
- Utilisation pour des estimations des débits

4.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

Au moyen de traitements numériques complexes, la technologie radar SAR permet de mesurer instantanément la composante dans l'axe du radar du courant sur une surface liquide diélectrique. En effet, les courants contribuent au décalage Doppler des ondes électromagnétiques réfléchies par la surface océanique et au moyen de modèle permettant d'estimer la contribution liée à l'état de mer, ces courants peuvent en être déduits. A ce jour, cette technologie a été mise en application sur les grands courants océaniques. Des travaux de R&D sont en progrès constants pour affiner ces résultats et tenter de les appliquer sur les surfaces d'eau continentales (estuaire de l'Amazone).

Les satellites SAR actuels (Radarsat-2, TerraSAR-X) et futurs (RadarSat-C1, RadarSat-C2, RadarSat-C3, Sentinel-1A, TSX-NG) permettent et permettront d'affiner cette technologie.

Des études R&D montrent qu'on peut déduire également la vitesse des courants dans l'axe de visée du radar par l'interférométrie along track (ATI), basée sur le déphasage entre les signaux de deux acquisitions dans un délai très court inférieur au temps de décorrélation des vagues (quelques millisecondes). L'antenne de TerraSAR-X a un mode expérimental (split antenna) qui le permet.

Pour plus d'information : http://sss.terrasar-x.dlr.de/papers_sci_meet_4/oral/MTH0929_romeiser.pdf.

5. DEBIT

5.1. DEFINITION

Le débit du cours d'eau, (Q et exprimé en m3/s ou l/s), représente le volume total d'eau qui s'écoule à travers une section droite d'un cours d'eau pendant une unité de temps.

Généralement, on ne dispose pas d'une mesure directe et continue des débits mais d'un enregistrement des variations de la hauteur d'eau en une section donnée (station hydrométrique). On passe alors de la courbe des hauteurs d'eau en fonction du temps H=f(t) (limnigramme) à celle des débits Q=f(t) (hydrogramme) par l'établissement d'une courbe de tarage Q=f(H).

La détermination de la courbe de tarage est généralement effectuée au moyen de campagnes de mesures de débits épisodiques, à plusieurs moments du cycle hydrologique répartis entre les basses et les hautes eaux. La mesure de la courbe de tarage est souvent reproduite pour tenir compte d'éventuelles modifications de la section du cours d'eau. La méthode de mesure des débits la plus commune consiste à calculer le débit à partir du champ de vitesse déterminé dans une section transversale du cours d'eau (en un certain nombre de points, situés le long de verticales judicieusement réparties sur la largeur du cours d'eau). Parallèlement à cette exploration du champ de vitesse, on relève le profil en travers du cours d'eau en mesurant sa largeur et en effectuant des mesures de profondeur.

Le débit Q [m3/s] s'écoulant dans une section d'écoulement S [m2] d'une rivière peut être défini à partir de la vitesse moyenne V [m/s] perpendiculaire à cette section par la relation :

$Q = V \times S$.

La section d'écoulement peut être évaluée en relevant la profondeur d'eau en diverses verticales réparties régulièrement sur toute la largeur. La vitesse d'écoulement est généralement mesurée sur les diverses verticales et à plusieurs profondeurs avec un « moulinet » voire avec un ADCP.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

N.B. : l'erreur associée aux estimations de débit, même obtenues à partir des méthodes classiques in situ, est souvent de l'ordre de 20 à 30%.

Depuis quelques années, un effort de recherche notable porte sur une spatialisation accrue de la mesure du débit, le but étant de s'affranchir le plus possible des observations in situ, ou au moins de mettre au point de nouvelles méthodologies d'estimation basées sur des grandeurs mesurables depuis l'espace.

5.2. UTILISATIONS

- Estimation de ressource en eau
- Dimensionnement d'ouvrages
- Calage/validation de modèles

5.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

Les technologies spatiales donnent principalement l'accès aux caractéristiques de surface des plans d'eau.

Actuellement, il est d'ores et déjà possible d'estimer des séries temporelles de débit en combinant des mesures de niveau obtenues par altimétrie spatiale avec des courbes de tarage issues de campagnes de mesures in situ. La mesure altimétrique vient alors compléter, voire remplacer d'éventuelles mesures in situ de hauteur d'eau.

L'utilisation de MNT haute résolution et d'imagerie optique et/ou SAR à différents moments du cycle hydrologique peut également permettre de caractériser depuis l'espace les variations temporelles de la géométrie de la section d'écoulement. Combiner cette géométrie de section d'écoulement avec des informations de hauteur permet d'approcher les volumes d'eau mis en jeu, premier pas vers l'estimation de débit.

L'interférométrie radar donne accès aux pentes de surface (interférométrie across-track) et aux vitesses de surface (interférométrie along-track), caractérisant ainsi la dynamique d'écoulement.

La combinaison de toutes ces observations spatiales pour l'estimation du débit est encore au stade de la R&D mais des progrès importants ont été réalisés ces dernières années, même si la mesure in situ de certains paramètres hydrauliques reste de mise. On mentionnera par exemple la structuration d'un groupe de travail dans le cadre de SWOT, ainsi que les travaux de J. Negrel & al. (Maison de la Télédétection, Montpellier) : http://tetis.teledetection.fr/index.php/fr/337-soutenance-de-these-jean-negrel,

http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/64/71/54/PDF/MT2011-PUB00033855.pdf

5.4. DEBIT PAR TARAGE ET HAUTEURS ALTIMETRIQUES

Paramètre	Débit par tarage et hauteurs altimétriques
Type de technologie	**Altimétrie Radar** **Observation continue au nadir**
Instrument(s) embarqué(s)	Radar altimètre sur les satellites : Passé : ERS (Europe), TOPEX/Poseidon (USA/France), Envisat (Europe)[3], GFO (USA), HY-2A (Chine) Actuel : Jason-1, Jason-2 (USA/France) et SARAL-Altika (Inde/France) ; Cryosat2 (Europe - altimétrie SAR). Futur : Sentinel-3 A& B (Europe), HY-2B (Chine), Jason-3, Jason CS… Lidar, altimétrie laser sur ICESat-2 (USA; 2016) suite à l'expérience ICESat-I Radar interférométrique avec la mission SWOT (USA/France, 2020)
Mode de production	Obtention du débit à partir d'une courbe de tarage (abaque) et des mesures de niveaux d'eau obtenues par altimétrie)

[3] ERS, TOPEX/Poseidon, ENVISAT, Jason-1, IceSat sont des missions terminées. Les données d'archive sont disponibles

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

Maturité	L'utilisation de l'altimétrie pour produire des hauteurs d'eau est opérationnelle aux intersections des traces satellites et des fleuves.
Perspective	Extraction de hauteurs d'eau relative à partir de formes d'onde du signal altimétrique : altimétrie conventionnelle et complément avec autres satellites altimétriques (SARAL-AltiKa, Sentinel-3, Jason-3, Jason CS…). Géométrie de la section d'écoulement : MNT, imagerie SAR/optique, stéréographie SPOT5 et interférométrie SAR.
Automatisation	Possible, mais nécessite la connaissance ou le calcul de paramètres spécifiques à chaque site d'observation
Données associées	Mesures in situ de profils de courants et de bathymétrie (définition de la section du fleuve) à plusieurs niveau d'eau (étiage, régime normal et crues) pour produire une courbe de tarage. Suivant la géomorphologie du lit du fleuve et de son régime cette courbe doit être remise à jour avec une certaine régularité. Des images optiques et des modèles numériques de terrain peuvent compléter la mesure in situ.
Domaine d'observation	Sections de fleuve sous trace satellite altimétrique
Résolution spatiale	Actuelle : Hauteur d'eau : dimension de plan d'eau de 150 m au mieux (cas favorable). Géométrie de la section d'écoulement : métrique (optique) à pluri-métrique Future : Hauteur d'eau : dimension de plan d'eau < 100 m (AltiKa…). Géométrie de la section d'écoulement : submétrique (optique) à pluri-métrique
Résolution temporelle	Actuelle : Hauteur d'eau : de 10 à 35 jours suivant la mission altimétrique et de l'ordre de quelques jours grâce à la combinaison de satellites sur des sections voisines (le long de la trace, suivant géométries relatives du fleuve et couverture satellite). Géométrie de la section d'écoulement : de 1 à 5 jours suivant temps de revisite des satellites. Future : Idem et dépendant du nombre de missions en vol
Précision	Actuelle : Hauteur d'eau : 10 à 50 cm en précision verticale et mesures à 20Hz, soit 1 mesure tous les 250 m le long des traces. Géométrie de la section d'écoulement : de l'ordre du mètre (au mieux) en horizontal et en vertical Future : Hauteur relative : 5 à 30 cm en précision verticale et mesures à 40Hz pour AltiKa par exemple, soit 1 mesure tous les 100 m le long des traces. Géométrie de la section d'écoulement : mieux que le mètre en horizontal et en vertical
Format des données	Fichiers de données, séries temporelles, graphiques
Accès données	Hauteur d'eau (par altimétrie) : ▪ Accès libre ▪ Historique des données : depuis fin 1992 pour l'altimétrie ▪ Sources : agences spatiales, HydroWeb, River & Lake… Géométrie de la section d'écoulement : ▪ MNT globaux accessibles facilement (Internet) ▪ MNT spécifiques sur demande (ex : stéréographie SPOT5) Délinéation de plans d'eau sur images optique/SAR à la demande
Pérennité des données	Bonne, instruments altimètres en vol jusqu'à 2027
Délais de mise à disposition	Actuelle : A partir de J+1, et la donnée doit être analysée Future : Mieux qu'actuellement
Contraintes à l'utilisation	▪ Mesure du débit considérée inaccessible à la mesure spatiale jusqu'à il y a quelques années (évolution difficile des mentalités). ▪ Etudes prometteuses sur le sujet

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

- Courbe de tarage mesurée in situ pratiquement indispensable sauf éventuellement si observation possible du lit du fleuve à sec
- Combinaison de plusieurs techniques et donc des limitations et contraintes de chacune des techniques mises en œuvre

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

6. STOCK EN EAU SOUTERRAINE

6.1. DEFINITION

Le stock en eau souterraine est défini ici comme étant les eaux qui se trouvent dans le sous-sol et qui transitent plus ou moins rapidement (jour, mois, année, siècle, millénaire) dans les fissures et les pores en milieu saturé ou non. En première approximation, il s'agit des nappes et aquifères.

6.2. UTILISATIONS

- Gestion des ressources en eau
- Modélisation du cycle de l'eau

6.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

Le niveau des nappes ne peut être obtenu directement par observation satellite et fait souvent l'objet de mesures piézométriques.

Des technologies satellites (gravimétrie spatiale, satellites GRACE et GOCE) permettent d'accéder aux variations du contenu global en eau (surface et nappes) qui correspondent à celles des eaux souterraines en l'absence ou faible présence d'eau de surface.

Par « soustraction » des eaux de surface, si elles sont conséquentes, on obtient les variations de volume des nappes.

Les études actuelles par satellite concernent des nappes de plusieurs centaines de km d'extension.

6.4. STOCK D'EAU SOUTERRAINE PAR GRAVIMETRIE

Paramètre	Stock en eau souterraine (Variations du stock en eau souterraine par gravimétrie spatiale)
Type de technologie	**Gravimétrie** **Observation continue**
Instrument(s) embarqué(s)	GRACE (USA/DE - 2002) et GOCE (Europe - 2009) Futur : Mission GRACE Follow On (USA/DE)
Mode de production	La technique consiste à mesurer les variations du champ de gravimètrie à partir des variations de distance entre deux satellites qui se suivent sur une même orbite, en les combinant avec la position des satellites fournie par les GPS. Les fluctuations temporelles du contenu en eau des réservoirs superficiels et souterrains induisent des perturbations spatiotemporelles du champ de gravité. L'analyse des fluctuations fines des trajectoires orbitales des satellites gravimétriques permet la cartographie dans le temps et dans l'espace du champ de gravité terrestre et donc d'estimer la variabilité des stocks d'eau.
Maturité	Moyenne : cas d'études en nombre limité, principalement de quelques grands bassins et régions hydrologiques (Californie - Inde). La résolution au sol est de l'ordre de 300 à 400 km
Perspective	Moyenne : la résolution spatiale des mesures permettra d'accéder à de petits réservoirs souterrains (de l'ordre de 10kms)
Automatisation	A ce jour, il n'y a pas d'automatisation possible car l'utilisation de cette technologie est encore en grande part au stade de la recherche
Données associées	Variabilité des stocks d'eau superficiels, de manière à les soustraire de la mesure intégrée et accéder aux stocks en eau souterraine.
Résolution spatiale	Actuelle : modèle résolution :100 à 150 km au mieux,

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

	Future : quelques dizaines de kilomètres au mieux
Résolution temporelle	mensuelle, cartes tous les 10 jours produites par le GRGS
Précision	Actuelle : quelques cm en équivalent de hauteur d'eau
Format des données	Produits experts. Exemple : cartes mensuelles du champ de gravité
Accès données	Via les agences spatiales et laboratoires de recherche ▪ http://www.legos.obs-mip.fr/produits/grand-public/les-principaux-produits/grace
Pérennité des données	Moyenne à faible (GOCE en fin de mission), GRACE FO (2017-2022), GRACE-II (2030-2033)
Délais de mise à disposition	Actuels : J+quelques semaines
Contraintes à l'utilisation	Séparation assez difficile des différentes contributions à la mesure intégrée du contenu en eau (atmosphère, eau superficielle, océan). D'autres variations géophysiques peuvent induire des variations dans la mesure. Les observations à grande échelle, uniquement sur les bassins suffisamment étendus (plusieurs centaines de kilomètres) peuvent être utilisées.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

7. HUMIDITE DE SURFACE DU SOL

7.1. DEFINITION

La teneur en eau, ou humidité du sol va caractériser le contenu en eau et donc l'état de saturation du sol. Ce paramètre va déterminer la propension du sol à ruisseler plus ou moins (et donc produire des crues) lors d'une averse, impacter les mécanismes d'évaporation, d'infiltration de l'eau dans les sols. La teneur en eau dans la zone racinaire peut influer sur le stress hydrique de la végétation en relation, et donc les besoins en irrigation (ce stress est également conditionné par la nature des plantes et leur capacité d'adaptation au climat). Cette teneur en eau du sol peut-être mesurée en agriculture par des tensiomètres, voire des sondes à neutrons.

On distingue l'humidité du sol en surface (les 4-5 premiers cm) et l'humidité plus profonde, dans la zone racinaire et en dessous (nappes).

L'humidité du sol est généralement exprimée en unités gravimétriques (g/cm3) ou volumétriques (m3/m3), ou sous forme d'indice (%) par rapport à la capacité de saturation du sol.

Pour la caractérisation d'un bassin versant, la résolution minimum souhaitée de l'ordre du 1/100 de la taille du bassin versant. En agriculture, l'échelle de travail est celle de la parcelle (100m). En météorologie et en climatologie, elles sont respectivement de l'ordre de 25-50 km et 100-250 km.

7.2. UTILISATIONS

- Gestion des ressources en eau
- Pilotage de l'irrigation
- Prévision des crues
- Modélisation du cycle de l'eau

7.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

Le paramètre intéressant est la valeur totale d'eau disponible dans la zone non saturée. A ce jour les approches directes envisagées (avec l'utilisation de instruments radiomètres dans des basses fréquences - des longueurs d'onde de plusieurs mètres - de manière à atteindre des couches plus profondes) ont été mises en suspens car elles posent de gros problèmes en termes de résolution spatiale (quelques milliers de km) et d'effets ionosphériques.

L'approche indirecte est la seule utilisée à ce jour. Elle s'appuie sur des techniques d'assimilation. Ces dernières utilisent des modèles pour déduire l'humidité du sol de la zone racinaire en utilisant des mesures régulière de la surface ainsi que des conditions de forçage. L'approche « assimilation » a été validée en utilisant des simulations ainsi que des données de terrain. La véritable limitation porte sur les possibilités des modèles ainsi que sur la qualité des données d'entrée et la fréquence des observations.

L'humidité en surface, utilisée dans ces modèles, est accessible par télédétection :

En un point et à un moment donné, la mesure de l'humidité des sols est relativement facile avec un échantillonnage gravimétrique in-situ. Sur des grandes surfaces, seules des approches utilisant la télédétection permettent d'accéder à cette donnée en surface.

Comme les systèmes micro-ondes mesurent la constante diélectrique des sols, qui est directement liée à la teneur en eau, les méthodes sur l'évaluation de l'humidité du sol s'appuient sur les instruments dont le signal est modifié par cette constante :

- Les radars imageurs radar SAR. Ils permettent une résolution spatiale fine (quelques mètres). Mais des fréquences d'observation faibles (mensuelles) mettent en évidence de fortes variations du signal :effets de "speckle" ainsi qu' une sensibilité élevée à la distribution géométrie des éléments diffusants (feuilles, troncs, surface du sol…) de la surface. La conséquence directe de ces perturbations est que le signal est au moins autant sensible à la rugosité de la surface qu'à son l'humidité. Ces signaux sont donc exploitables en absolu sur des sols à faible couvert végétal ou en variationnel pour des détections de changements.
- Les radars diffusiomètres. Leur utilisation offre un compromis intéressant. La résolution spatiale est beaucoup plus grossière (des dizaines de kilomètres), mais avec une plus large fauchée permettant raisonnablement d'obtenir une couverture tous les 4-6 jours en moyenne. De plus, elle offre l'avantage d'être beaucoup moins soumise au speckle (en moyenne). L'effet de la végétation est

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

dans ce cas encore significative et correspond en gros à la réponse de la bande C (ERS-1), cette bande est la fréquence la plus basse actuellement disponible pour les diffusiomètres en orbite. Ainsi, la plupart des résultats intéressants ont été obtenus sur les zones arides et semi-arides où la végétation et l'humidité des sols sont de toute façon très fortement corrélées. L'influence de la rugosité de surface est également importante et il est préférable d'opérer en utilisant la détection des changements. Pour exemple, les diffusiomètres à bord des satellites ERS sont des capteurs radar à faible résolution spatiale (50 km) et à haute résolution temporelle (une acquisition tous les 3-4 jours environ).

- Les radiomètres micro-ondes (en vol, SMOS et SCD/Aquarius en bande-L et AMSR-2 en bande-C): la technique est ancienne et bien maîtrisée, de nombreux capteurs s'appuient sur des sondeurs micro-ondes passifs. Pour en déduire l'humidité du sol, ces systèmes offrent le meilleur compromis s'ils sont utilisés dans les basses fréquences, comme cela a été démontré au début des années 1970 avec la très courte mission Skylab. Toutefois, pour être efficace, il faut travailler dans une bande protégée pour éviter les fréquences radio indésirables (RFI) et les émissions humaines ; cette bande doit aussi être sensible à l'humidité du sol lorsque l'atmosphère est transparente et que la végétation joue un rôle limité. Dans la bande L, les émissivités peuvent varier de près de 0,5 pour un sol très humide à près de 1 pour un très sec, ce qui correspond à une fourchette de 80 -100 K en termes de température de brillance. Pour un instrument typique, la sensibilité est généralement de l'ordre de 1 K, ce qui donne un équivalent de 80-100 niveaux d'humidité du sol discernables. Comme les températures émises ne sont pas mesurées de façon cohérente, la rugosité de surface et la structure de la végétation jouent un rôle réduit par rapport à un système actif.

7.4. HUMIDITE DE SURFACE DU SOL PAR IMAGERIE SAR (INDICE)

Paramètre	Humidité de surface du sol (indice)
Type de technologie	**Radar imageur SAR (Small Aperture Radar)** Prise d'images programmées, différents angles d'incidence et niveaux de zoom possibles
Instrument(s) embarqué(s)	Radar SAR sur satellites : Passé : ALOS, ENVISAT, ERS, RadarSAT 1… Actuel : constellation Cosmo-Skymed (CSK), RadarSat2, TerraSAR-X (TSX)… Futur : RCM, Sentinel 1A/B), BIOMASS…
Mode de production	Mesure de la constante diélectrique des sols (qui est fonction de sa teneur en eau) par radar en bande L. (Des travaux ont été réalisés également en bande C et X). La mesure restituée est le coefficient de rétrodiffusion(Sigma0) du signal radar (le rapport de puissance signal/émis/signal reçu). Cette rétrodiffusion est directement influencée par les propriétés réfléchissantes de la cible (surface du sol et végétation). Une partie des émissions radar est absorbée par le sol (selon la permittivité ou la constante diélectrique du sol), une autre est réfléchie « élastiquement » par les surfaces des objets « éclairés ». La réflexion « élastique » est directement fonction de la rugosité de la surface et du couvert végétal. Ces observations sont également fonction de l'angle d'incidence. La constante diélectrique est directement liée à la teneur en eau (les ondes électromagnétiques aux fréquences radar, ne pénètrent pas dans 100% d'eau) et c'est grandeur qui est recherchée. La difficulté inhérente aux mesures d'humidité par radar SAR tient donc à : • l'affranchissement de ce qui ne relève que de la rugosité, d'autant plus qu'on ne dispose le plus souvent que d'une seule image (et angle de visée) à la fois. • la constante diélectrique varie souvent à de petites échelles. • les plantes en général et en particulier les cultures des sols cultivés, suivant les phases de maturation, présentent des teneurs en eau qui perturbent la mesure. • Enfin le signal est affecté par le « speckle* » En conséquence, les mesures radar ne sont utilisées que comme indice pour évaluer les changements d'une image à une autre.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

	On constitue un historique de la plus longue durée possible sur la zone ciblée et on définit des valeurs extrêmes (haute et basse) du coefficient de rétro diffusion. En supposant que le signal « rugosité » reste inchangé entre les images, on fournit un indice d'humidité entre 0 et 100% sur l'échelle de valeur établie à partir des extrêmes. Sur un jeu d'images rapprochées dans le temps (avec le même angle de mesure), il également possible de donner une indication de la variation d'humidité dans le sol en supposant toutes les autres conditions (végétation, rugosité) constantes. Compte tenu du caractère un peu empirique de ces mesures, il est utile d'étalonner la méthode au moyen de données *in situ* qui permettent de mieux cerner l'humidité de surface. La technologie se prête mieux à l'observation des zones à faible couverture végétale. Cependant, dans des sols très secs (souvent associés à l'absence de végétation), les rayons pénètrent et peuvent être réfléchis par une nappe d'eau souterraine. Ce qui explique les travaux sur le SAR dans ce domaine visant à détecter de l'eau en zones arides. A noter aussi, l'existence de travaux pour qualifier la saturation des sols nus et donc déduire des ruissèlements de surfaces dans des modèles hydro de prévisions de crues (Cf projet Inferno ESA par exemple). . **L'effet dit de « speckle » est un brouillage de l'image lié à une multitude de petites surfaces réfléchissant les signaux radar dans toutes les directions.*
Maturité	Moyenne pour l'indice. Utilisation par les chercheurs comme indice de variation. La résolution spatiale est intéressante. Requiert des prises d'images fréquentes (impact prix, envisageable avec les données de Sentinel 1 et 2 qui seront en accès libre).
Perspective	Pas de grande évolution en vue à ce stade
Automatisation	Faible, l'interprétation nécessite de faire la part de la rugosité du sol et de celle de l'humidité dans le signal, une bonne connaissance du type de sol, des variations saisonnières et du couvert végétal.
Données associées	Type de sols (nature et occupation des sols), données in situ de calibration
Domaine d'observation	Mondial, car les satellites embarquant des instruments SAR couvrent le globe, mais le nombre d'images est réduit.
Résolution spatiale	Quelques mètres à 100 m
Résolution temporelle	Avec l'ensemble des radars embarqués, une mesure quotidienne possible (nécessité de programmation préalable sur plusieurs satellites) sur un site donné mais avec des fréquences, polarisations et angle d'incidence variables.
Précision	Une variation d'~1 dB sur le signal conduit à des variations de l'ordre de 20% sur l'indice. Nécessité d'étalonner correctement le Sigma0 localement avec des coins réflecteurs. On peut espérer 4 à 5 niveaux d'humidité.
Format des données	Format sous forme de bases de données numériques géoréférencées
Accès données	Restreint (payant, actuel), Sentinel-1 (libre mais quel sera le volume d'images sur la zone d'intérêt). Images niveau 2, via les opérateurs fournisseurs de données satellite ou des sociétés de service (Astrium, MDA, Telespazio) Traitements « maison » auprès de laboratoires ou de quelques sociétés de service
Pérennité des données	Bonne, une dizaine de satellites programmés ou considérés, des instruments en vol jusqu'en 2025.
Délais de mise à disposition	Quelques heures pour l'image seule.
Contraintes à	Le signal est au moins autant sensible à la rugosité de la surface (feuilles, troncs,

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

l'utilisation	surface du sol, etc.) qu'à son l'humidité. Ces signaux ne sont donc pratiquement pas exploitables en absolu. Utilisé sous forme d'indice pour la détection de changements.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

7.5. HUMIDITE DE SURFACE DU SOL PAR DIFFUSIOMETRE RADAR (INDICE)

Paramètre	Humidité de surface du sol (indice)
Type de technologie	**Diffusiométrie radar (scatterometers) en bande-C** Observation continue, latérale (side-looking) de bandes de ~ 100 km,
Instrument(s) embarqué(s)	Ascat sur Metop-A et Metop-B en vol, et Metop-C prévu en 2016 (Europe) AMI sur ERS-1, ERS-2 (Europe), missions terminées
Mode de production	Comme pour le radar SAR, le paramètre que l'on cherche à mesurer est la constante diélectrique des sols (qui est fonction de sa teneur en eau). Les différences qui rendent cette technique plus attractive que celle du radar SAR sont : • les observations des diffusiomètres embarqués sont continues (nul besoin de les commander) et donc très fréquentes. Les historiques sont donc facilement constitués. • les diffusiomètres récupèrent le signal émis sur deux à trois antennes ce qui permet, à chaque passage satellite, d'avoir plusieurs angles de vue de la même zone, et donc deux à 3 valeurs du coefficient de rétrodiffusion Sigma0. • les signaux des deux images sont moyennés ce qui rend l'image résultante moins sensible au speckle* et à la végétation. **L'effet dit de « speckle » est un brouillage de l'image lié à une multitude de petites surfaces réfléchissant les signaux radar dans toutes les directions.*
Maturité	Bonne, méthode utilisée en opérationnel par les agences météorologiques comme EumetSat et par la recherche pour les études météorologiques et climatologiques. La faible résolution spatiale limite son intérêt pour l'agriculture.
Automatisation	Semi automatique. La méthode de détection de changement repose sur une connaissance des extrêmes. Si un sol d'ordinaire sec est brutalement inondé, l'algorithme trouvera des valeurs non physiques et donc il n'y aura pas d'estimation (exemple des dernières inondations en Australie au cours desquelles les valeurs d'humidité sont sorties des extrêmes utilisés). Il faut donc régulièrement et point par point réexaminer l'historique des valeurs rencontrées afin d'ajuster les valeurs min et max ou avoir recours à des mesures in situ.
Données associées	Type de sols (nature et occupation des sols)
Domaine d'observation	Mondial, car les satellites embarquant des radars diffusiomètres couvrent le globe.
Résolution spatiale	25 à 50 kilomètres
Résolution temporelle	Quelques jours
Précision	Une variation d'~1 dB sur le signal conduit à des variations de l'ordre de 20% sur l'indice.
Format des données	Indice (entre 0 et 100%) sous forme de fichiers numériques (GTS BUFR, NetCDF…) Détail des produits et des formats : http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/eps-pg/ASCAT/ASCAT-PG-6ProdFormDis.htm#TOC61
Accès données	Libre (EumetSat H-SAF) http://www.eumetsat.int/Home/Main/DataProducts/Land/index.htm?l=en

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

	Dissémination via le GTS
Pérennité des données	Moyenne, quelques instruments en vol jusqu'en 2021.
Délais de mise à disposition	Quelques jours
Contraintes à l'utilisation	Le signal est autant sensible à la rugosité de la surface (feuilles, troncs, surface du sol…) qu'à son l'humidité. Ces signaux ne sont donc pas exploitables en absolu et marchent bien sur des sols à faible couvert végétal. Il nécessite l'utilisation de méthodes reposant sur la détection des changements.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

7.6. HUMIDITE DU SOL PAR RADIOMETRIE MICRO-ONDES

Paramètre	Humidité du sol
Type de technologie	**Radiométrie micro-ondes** **Observation continue, balayage transverse de bandes de plus de 1000km**
Instrument(s) embarqué(s)	Radiométrie micro-onde en bande L : Aquarius sur SAC-D (USA/Argentine), SMOS (Europe), Radiométrie micro-onde en bande C : AMSR-2 sur GCOM-W1(Japon) en vol,
Mode de production	La mesure fournie est l'humidité des sols dans les 4-5 premiers centimètres du sol. L'instrument radiomètre, comme SMOS, détermine la constante diélectrique des sols, directement liée à la teneur en eau, à partir de la mesure de signaux micro-ondes basses fréquence, en bande-L, émis naturellement par le sol. Dans la bande L, les émissivités peuvent varier de près de 0,5 pour un sol très humide à près de 1 pour un sol très sec, ce qui correspond à une fourchette de 80 -100 K en terme de température de brillance. Pour un instrument typique, la sensibilité est généralement de l'ordre de 1 K, ce qui donne un équivalent de 80-100 niveaux d'humidité du sol discernables. Comme les températures émises ne sont pas mesurées de façon cohérentes, la rugosité de surface et la structure de la végétation jouent un rôle réduit par rapport à un système actif. L'algorithme utilisé est basé sur une méthode itérative (modèle TR) qui cherche à minimiser l'écart entre la température de brillance observée par l'instrument et la température de brillance estimée à partir d'autres sources de données (type de sol (FAO), température fournie par ECMWF et la couverture végétale (obtenue par imagerie optique (Ecoclimap). Du meilleur ajustement (*best fit*), est déduit la valeur de la constante diélectrique optimale et l'humidité du sol associée.
Maturité	Bonne, utilisation opérationnelle ou semi-opérationnelle principalement par le monde de la recherche. La NOAA utilise l'humidité des sols en opérationnel pour fournir des indices de crue éclair (flash flood). Il existe des zones d'interférence radioélectrique (Europe de l'est, Chine), qui perturbent les mesures. Des campagnes sont en cours pour arrêter ces sources illégales. Des adaptations de la chaine de réception ou des traitements au sol permettent de réduire l'impact de ces perturbations.
Perspective	SMAP en 2014(USA), GCOM-W2 en 2016 et GCOM-W3 en 2020 (Japon) SMOS Next à l'étude, ainsi qu'un satellite Chinois.
Automatisation	Complète
Données associées	Type de sol (FAO), Température physique (ECMWF), occupation des sols - couvert végétal (Ecoclimap).
Domaine d'observation	Mondial
Résolution spatiale	43 km en moyenne, des techniques de désagrégation de la donnée, utilisant des données externe, permettent de redistribuer l'humidité moyenne et d'améliorer la résolution (typiquement 1 km).
Résolution temporelle	2 images tous les 3 jours à l'équateur (6 heures et 18 heures). Couverture quasi quotidienne à 47° de latitude
Précision	De l'ordre de 0,06 m3.m-3 mais dépend du type de sol et de végétation (meilleur pour faible couverture végétale, moins bonne sous végétation dense (forêts)
Format des données	Formats NetCDF, Bin Hex

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

Accès données	Libre via le centre CATDS de Brest, niveaux 3 et 4 (et synthèses quotidiennes) L'ESA fournit des fichiers d'humidité des sols (traitements de niveau 2) et de température de brillance (traitements de niveau 1) Les températures de brillance sont diffusées sur le réseau GTS de l'OMM
Pérennité des données	Moyenne, SMOS, GCOM-W1 aujourd'hui, SMAP(2014), GCOM-W1-W2 à l'étude. Instruments en vol jusqu'en 2022
Délais de mise à disposition	• Données NRT (Near Real Time, quasi-réel) : <180 mn • Données finalisées : à J+1
Contraintes à l'utilisation	Technologie encore peu connue donc peu utilisée

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

8. DEBIT DES FONTES DE NEIGE OU DE GLACE

8.1. DEFINITION

La quantité d'eau contenue dans les glaces et dans le manteau neigeux, et son évolution au cours des saisons sont des paramètres importants du cycle de l'eau. La situation de ces réserves d'eau conditionne le régime des rivières qu'elle alimente. Elle augmente les débits et les risques de crues en période de fonte intensive ; réduit l'étiage des cours d'eau en périodes sèches. Cette connaissance permet donc d'anticiper l'approvisionnement en eau des bassins versants situés en aval.

8.2. UTILISATIONS

- Gestion des ressources en eau
- Modélisation du cycle de l'eau
- Navigation et prévision de débâcle pour les masses d'eau gelées

8.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

L'épaisseur de glace et de neige est une grandeur difficile à obtenir par observation satellite et, également, par la mesure in-situ compte tenu des difficultés d'accès aux zones à observer, des conditions météorologiques, et également de l'absence de technique de mesure simple.

Glaces de mer (banquise)

Certaines technologies comme celle qui est utilisée par l'instrument de SIRAL (satellite CryoSat-2) estiment l'épaisseur des glaces de mer en bordure de la banquise par mesure du dénivelé entre la surface de la mer et la surface de la banquise.

Epaisseur de neige sur de grandes plaines à relief modéré

Une technologie, appliquée aux plaines du grand Nord, au relief peu accusé fournit le contenu en eau dans la neige (snow water content), donne des résultats satisfaisants, avec des résolutions de 25 km. Le produit opérationnel est réalisé à partir de la mesure de l'émissivité du sol par des radiomètres micro-ondes SSM/I (satellite DMSP F-14), AMSR-E (satellite Aqua) (2002 à 2009) (réf. site http://nsidc.org/data/ae_5dsno.html http://nsidc.org/, http://nsidc.org/research/projects/Armstrong_AMSR-E_Validation.html). Elle nécessite des calibrations in-situ compte tenu des variations importantes du coefficient de rétrodiffusion suivant l'état de la neige. C'est aussi ce qui limite son intérêt en zone montagneuse, en plus de la faible résolution spatiale de la mesure.

Epaisseur des glaciers

Il est possible de mesurer l'épaisseur des grands glaciers continentaux par une combinaison de technologies spatiales : radar SAR/altimètre/gravimètre.

Références : Consistent patterns of Antarctic ice sheet interannual variations from ENVISAT radar altimetry and GRACE satellite gravimetry Martin Horwath1,2,*, Benoît Legrésy1, Frédérique Rémy1, Fabien Blarel1, Jean-Michel Lemoine, Geophysical Journal International, Volume 189, Issue 2, pages 863–876, May 2012

A noter, une mission à l'étude par l'agence spatiale européenne CoreH2O (mission ESA en phase A) basée sur l'utilisation de deux radars jumeaux à synthèse d'ouverture de fréquence (SAR, 9,6 et 17,2 GHz) pour fournir par tous les temps et toute l'année des informations aux échelles régionales et continentales, sur le contenu en eau de la neige.

http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/Future_missions/Future_missions

Cryosat-2 donne l'altitude ponctuelle sur les calottes ou glaciers (applicable sur des gros glaciers ex Himalaya)

Les traitements stéréographiques réalisés à partir d'images haute résolution (SPOT, ASTER, PLEAIDES, Ikonos…) donnent, par observations successives, les variations de hauteur des glaciers et donc renseignent sur leur évolution.

Ces approches ne sont donc pas applicables à la détermination des réserves d'eau dans les zones montagneuses. En conséquence, les technologies spatiales utilisées à ce jour portent sur la détermination de l'extension (2D) de la couverture neigeuse ou des glaciers qui est obtenue par les différentes techniques d'imagerie :

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

- Radiomètre imageur multispectral (VIS/IR)
- Imageur optique haute-résolution (HR)
- Radiomètre imageur multispectral (MW)
- Sondeur atmosphérique température et humidité.
- Radar imageur MW (SAR)
- Instrument à polarisation et direction multiples (MW, K-Band) (utilisation encore en R&D)

Les estimations du contenu en eau sont obtenues par des méthodes indirectes résultant de modélisation plus ou moins complexe, intégrant la topographie des massifs (MNT), et d'autres paramètres comme la température de l'air (pour l'estimation du débit de fonte).

8.4. DEBIT DES FONTES DE NEIGE OU DE GLACE EN ZONE MONTAGNEUSE PAR BASSIN VERSANT

Paramètre	**Débit des fontes de neige ou de glace en zone montagneuse par bassin versant**
Type de technologie	**Radiomètre Vis/IR** **Observation continue, balayage transverse**
Instrument(s) embarqué(s)	Modis, ETM (Landsat), Vegetation (Spot 4[4], 5, 6), Proba-V, Sentinel-2, 3, Suomi, LDCM….
Mode de production	L'extraction des extensions neigeuses et glacées est réalisée à partir de l'imagerie spatiale, principalement les radiomètres vis/IR (moyen IR). Un indice spectral dans le VIS/MIR fournit la fraction d'enneigée (0% à 100%) de chaque pixel de l'image. On récupère des données de température de l'air à un niveau donné, fournies par les agences météorologiques et on applique ensuite un modèle de fonte : une approche simple et robuste consiste à estimer la lame de fonte journalière en se basant sur la température de l'air (modèle « degré jour » ou *temperature index model*) par tranche d'altitude et de multiplier cette lame de fonte par la surface enneigée vue par satellite (modèle SRM par exemple). L'épaisseur de la neige est « ignorée », c.à.d. que l'on suppose qu'elle est suffisante pour produire le débit de fonte prédit par le modèle au cours de la journée. De ce fait, la méthode requiert des mises à jour régulières de l'extension de la couverture neigeuse. Evolution. future : Assimilation haute fréquence et haute résolution spatiale de la surface enneigée dans un modèle distribué du bilan d'énergie du manteau neigeux
Maturité	Mode de production mature : les algorithmes existent et sont validés, leurs limites connues. Le calage du modèle requiert des historiques de débit sur le bassin versant.
Données associées	• Topographie, compte tenu des résolutions des autres données, à ce jour, la résolution du MNT SRTM est satisfaisante (90 m), cela peut changer avec les données de Sentinel-2 (résolution 20 m). • Température de l'air (elle peut être estimée par des sorties de modèles météo en l'absence de stations de mesure in-situ)
Résolution spatiale	**Actuelle** MODIS 250-500 m de résolution Landsat 5 et 7, 30 m de résolution, (fréquence revisite de 16 j minimum). Ils ne sont plus utilisés, car le mode de balayage actuelle laisse des zones d'ombres. VGT (sur SPOT), 1 km de résolution, fréquence revisite minimum 1j (temps de

[4] Spot-4 a été désorbité en fin juin 2013.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

	livraison des données un peu long ou accès payant). Les produits d'extension neigeuse MODIS (NASA) neige (MOD10A2 (8j) et MOD10_L2 (quotidien) sont à 500m. **Future** ProbaV (lancé le 7 mai 2013), 300m de résolution (fréquence de reviste 1j). Sentinel-2 : 10-20 m de résolution, (fréquence revisite minimum 5j)
Résolution temporelle	Actuel et futur : quotidienne, environ (Revisite des satellites tous les jours ou 1,5 jours, Sentinel-2 tous les 5 j, délais de livraison encore inconnus pour ce dernier)
Précision	Le paramètre clé est la fréquence de remise à jour de l'extension du manteau neigeux. En second lieu, la résolution des images et la qualité et la résolution des données météorologiques (températures de surface). Les modèles les fournissent aujourd'hui avec une résolution de 0.5°/25km ; or, en région montagneuse, les variations locales peuvent être importantes. La résolution et la précision du MNT est satisfaisante aujourd'hui, et le sera toujours en France (carto 3D de l'IGN). L'autre facteur déterminant est le calage du modèle sur un bassin versant et repose sur la disponibilité d'historiques de débit de qualité dans les principaux court d'eau. *La performance hydrologique se mesure plutôt avec le critère de* Nash*. Des exemples sont fournis dans la doc de SRM. Les performances sont bonnes dans les bassins de montagne non karstiques et dominés par la fonte de la neige (où la pluie joue un rôle mineur)*
Format des données	*Rien n'est standardisé. L'idée est de fournir des séries temporelles de débit de fonte par bassin versant (Débits (m3/s), ou lame de fonte par bassin (mm))*
Accès données	Accès libre à des produits à couverture globale fournis par la NASA (MODIS) Sentinel-2 : données prévues pour être en accès libre (mais pas de produit neige, il faudra développer la chaîne de traitement) http://modis.gsfc.nasa.gov/data/
Pérennité des données	Très bonne, nombreux instruments prévus, certains encore en vol après 2030 (série MTG-I 1, 2, 3, 4)
Délais de mise à disposition	Le facteur limitant est la fourniture du produit extension neigeuse qui est livré à J+2, ou J+1 dans le meilleur des cas. Futur : idem
Contraintes à l'utilisation	• Disposer d'une bonne estimation de la température de l'air à l'altitude des pixels de le MNT via une courbe variation température/altitude) • Les images sont impactées par les nuages et il faut parfois attendre plusieurs jours pour avoir une image correcte. On considère qu'il en faut au moins une par semaine pour obtenir des simulations correctes (ce n'est pas toujours le cas). • Le modèle doit être calé sur des chroniques passées de température et débit. Le bassin versant doit disposer de stations de débit en opération pour qualifier les données.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

9. QUALITE DE L'EAU (TURBIDITE, COULEUR DE L'EAU, MATIERE EN SUSPENSION TOTALE)

9.1. DEFINITION

La turbidité de l'eau (et surtout ses variations) est une caractérisation de la charge de matière en suspension. La matière en suspension totale représente la totalité des particules en suspension dans l'eau (minérales, organiques et colloïdales). Cela peut aussi être un indicateur de pollution bactériologique.

L'eutrophisation est définie comme la modification et la dégradation d'un milieu aquatique, liée en général à un apport excessif de substances nutritives (azote et phosphore notamment, d'origine principalement agricole et eaux usées), qui augmentent la production d'algues et d'espèces aquatiques, ainsi parfois que la turbidité, pouvant occasionnellement le fond et la colonne d'eau de lumière.

9.2. UTILISATIONS

- Qualité de la ressource en eau et du milieu
- Suivi de pollutions
- Usage récréatifs de l'eau

9.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

- Imageur optique HR (high utility)
- Instrument couleur de l'eau de l'océan (high utility)
- Radiomètre imageur multi-spectral (VIS/IR) (high utility)
- Instrument à polarisation et direction multiples (visible/IR ou MW) (marginal utility)<-Terra (MISR)

9.4. QUALITE DE L'EAU PAR IMAGERIE VIS/NIR

Paramètre	**Qualité de l'eau (Turbidité, couleur de l'eau, matière en suspension totale)**
Type de technologie	**Imagerie Vis/NIR** **Observation continue, balayage transverse ou prise d'images programmée (HR), niveaux de zoom possibles**
Instrument(s) embarqué(s)	Passé : MERIS (ENVISAT), rappelé ici pour l'intérêt de sa base archive pour, par ex., qualifier l'euthrophisation des lacs. ° Actuels : Images MODIS sur satellites Terra et Aqua (produits de réflectance de surface). Données VIIRS images GeoEye-1, IKONOS, PLEIADES, QuickBird, RapidEye, Worldview, Landsat7/ETM+ Futurs : LDCM, Sentinel-2,3, Venus, Geo-Kompsat
Mode de production	Corrélation entre la radiance spectrale et les concentrations de surface en matière en suspension. Cette relation varie également suivant la nature de l'eau et l'origine de la matière en suspension. Les corrélations les plus pertinentes sont observées pour des longueurs d'onde entre 700 et 800 nm Imagerie optique pour la transparence de l'eau sur quelques mètres de profondeur
Maturité	Très bonne sur océan, maîtrise moins répandue sur eaux continentales à part sur grands estuaires et bassins (Bassin d'Arcachon…)
Perspective	Application sur fleuves et lacs des technologies développée sur océan avec des résolutions adaptées
Automatisation	Bonne sur océans. Besoin fort d'étalonnage in situ pour les eaux continentales
Données associées	Etalonnage in situ, Masque des plans d'eau, Corrections atmosphériques

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

Résolution spatiale	Actuelle : 250m pour MODIS, 650m pour VIIRS, quelques dizaines de mètres à quelques mètres pour l'optique HR (Landsat…) Futur : 10m avec l'optique HR des Sentinel 2 et 3.
Résolution temporelle	Environ journalière : ▪ impactée par la présence de nébulosité
Précision	Actuelle : de l'ordre de 50 mg/l pour la matière en suspension totale mesurée avec MODIS sur l'Amazone
Format des données	Images dans différentes bandes spectrales, éventuellement à composer
Accès données	Actuel : MODIS : libre,http://modis.gsfc.nasa.gov/data/ Optique haute résolution: service commercial, images à commander. Cet accès sera facilité dans le futur avec Sentinel 2 et 3.
Pérennité des données	Très bonne, un grand nombre de satellite, instruments en vol au delà de 2035 déjà planifiés
Délais de mise à disposition	J+0 pour MODIS, équivalent pour l'optique commerciale
Contraintes à l'utilisation	▪ Besoin d'étalonnage/calibration in situ pour les eaux continentales. ▪ Problème de la nébulosité ▪ Utilisation de MODIS réservée aux plans d'eau suffisamment étendus ▪ Amélioration attendue avec les imageurs HR des Sentinel 2 et 3

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

10. TEMPERATURE DES EAUX DE SURFACE

10.1. DEFINITION

L'importance de la température comme facteur décisif relativement à la qualité de l'eau tient à ses relations avec les autres paramètres. Le suivi de la température des eaux de surface permet de caractériser les échanges avec le milieu (exemple : remontée d'eau froide souterraine). L'influence de la température est également prépondérante dans la survie des micro-organismes et des poissons. En période d'étiage et en saison chaude, c'est un paramètre à surveiller de près car la baisse des niveaux d'eau peut entrainer des augmentations rapides, létales, de la température.

10.2. UTILISATIONS

- Qualité de la ressource en eau et du milieu
- Caractérisation des échanges entre eaux de surface et les aquifères des bassins versants

10.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

Mesure de l'émission infrarouge des premiers millimètres de la surface d'eau :

- Radiomètre imageur multi-spectral (MW) (high utility)
- Radiomètre imageur multi-spectral (vis/IR) (high utility)
- Sondeur atmosphérique température et humidité (high utility)

10.4. TEMPERATURE DE SURFACE DE L'EAU PAR RADIOMETRE INFRAROUGE THERMIQUE

Paramètre	**Température de surface de l'eau**
Type de technologie	**Radiomètre imageur infrarouge (TIR)** **Observation continue**
Instrument(s) embarqué(s)	AVHRR, MODIS, VIIRS
Mode de production	Mesure de l'émission infrarouge des premiers millimètres de la surface d'eau
Maturité	Bonne maturité sur océans et grands lacs car technologie utilisée depuis de nombreuses années. Moins bonne sur les fleuves et rivières
Perspective	L'amélioration de la résolution spatiale des capteurs permettra de mesurer des rivières de plus en plus petites
Automatisation	Livraison de carte combinant plusieurs satellites OK
Données associées	Calibration par mesure de la température in situ (programmes internationaux de bouées dérivantes dans les océans)
Domaine d'observation	Mondial
Résolution spatiale	De quelques kilomètres à quelques centaines de mètres.
Résolution temporelle	2 passages MODIS par jour par exemple
Précision	0.1°C
Format des	Images dans différentes bandes spectrales, éventuellement à composer (produit expert)

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

données	Cartes de température de surface préparées par organisme spécialisé
Accès données	MODIS en accès libre http://modis.gsfc.nasa.gov/data/
Pérennité des données	Très bonne, plusieurs missions satellites étant prévues dans les années à venir. Instruments en vol (prévus) pour au-delà de 2035.
Délais de mise à disposition	J+0 pour MODIS
Contraintes à l'utilisation	▪ Présence de nuages. Sur océans, des algorithmes existent pour limiter l'impact des nuages. ▪ Seuls les grands plans d'eau sont observables pour l'instant.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

11. VENT DE SURFACE

11.1. DEFINITION

Vitesse et direction du vent.

11.2. UTILISATIONS

- calcul de l'évaporation (vitesse)
- navigation sur un plan d'eau (vitesse et direction).

11.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

- Scatteromètre (grande utilité), utilisés à grande résolution pour la connaissance des vents sur la mer, où très grands lacs (résolution 25 à 50 km).
- Radar imageur (SAR) (grande utilité)
- Radar altimètre (grande utilité) mais nécessité de vagues importantes (creux au moins un m) et limitation sous-trace des satellites
- Radiomètre imageur multi-spectral (MW) (utilité potentielle)
- Radiomètre imageur multi-spectral (VIS/IR) (utilité potentielle)
- Lidar (utilité marginale) (dont direction)

11.4. VENT DE SURFACE PAR RADAR IMAGEUR SAR

Paramètre	Vent de surface
Type de technologie	**Radar imageur SAR** Prise d'images programmée, différents angles d'incidence et niveaux de zoom possibles
Instrument(s) embarqué(s)	Radar SAR sur satellites : Passé : ALOS, ENVISAT, ERS, RadarSAT 1… Actuel : constellation Cosmo-Skymed (CSK), RadarSat2, TerraSAR-X (TSX)… Futur : RCM, Sentinel 1A,B…
Mode de production	Extraction de la direction et la vitesse du vent (à 10 mètres) sur des surfaces d'eau par l'étude de l'écho radar (intensité et phase).
Maturité	Production opérationnelle de données de vent à 10 mètres. Technique appliquée en côtier, en estuaire, sur grands lacs
Perspective	Amélioration des traitements et de la résolution des images SAR
Automatisation	Complète
Données associées	Mesures de vent issues d'un modèle atmosphérique global
Domaine d'observation	Océans, mers et grands lacs de toute la planète.
Résolution spatiale	Actuel : 1km Future : <1km
Résolution temporelle	3 à 35 jours suivant la mission (sur cycle orbital répétitif), le mode d'acquisition et la latitude

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

	Résolution améliorée en combinant plusieurs missions
Précision	RMS : 1.5-2.0 m/s
Format des données	Format sous forme de bases de données numériques géoréférencées
Accès données	Restreint (payant) sur les missions actuelles
Pérennité des données	Bonne, une dizaine de satellites programmés ou considérés, des instruments en vol jusqu'en 2025.
Délais de mise à disposition	Actuel : Pas d'accès libre mais peut-être du temps réel (<15min) Futur : J+24h
Contraintes à l'utilisation	Zones de forts courants de surface, zones où la génération des vagues par le vent est altérée par autre chose (film naturel, pollution pétrolière…) Les plans d'eau doivent être suffisamment grands (plusieurs centaines de mètres)

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

12. CARTOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS

12.1. DEFINITION

La cartographie des bassins versants est destinée à décrire les processus hydrologiques qui gouvernent le cycle de l'eau : répartition de l'infiltration dans les nappes et du ruissellement vers les cours d'eau, réactivité du bassin versant à une averse, possibilité de reprise de l'eau dans le sol par évapotranspiration…

A une plus fine échelle que le bassin versant, les masses d'eau (rivières, lacs, canaux, zones humides) sont caractérisées: positionnement du réseau hydrographique, délimitation du lit mineur et majeur, caractérisation de zones d'assecs.

Ces paramètres sont généralement peu évolutifs dans le temps, aussi le temps de revisite du satellite n'est pas un facteur déterminant si l'on cherche à les acquérir depuis l'espace. La résolution minimum souhaitée de l'ordre du 1/100 de la taille du bassin versant pour la caractérisation globale de ce dernier. La résolution doit être plus précise si on travaille sur le positionnement des masses d'eau, des assecs (la résolution minimum souhaitée de l'ordre de la largeur du cours d'eau).

12.2. UTILISATIONS

- Etude de la ressource en eau
- Modélisation du cycle de l'eau (estimation de la recharge des nappes, du ruissellement…)
- Suivi des réservoirs de surface, estimation des surfaces, des stocks d'eau,
- Suivi des zones humides
- Etudes de crues
- Suivi de l'agriculture : état des cultures, estimation du stress hydrique, des besoins en eau, des pressions sur l'eau…

12.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

- Les imageurs optique HR (très utiles)
- Les radiomètres imageurs multi-spectral (Vis/IR) (très utiles quand on se satisfait de résolution de quelques centaines de mètres)
- Les imageurs radar SAR, (très utiles) renseignent sur la « rugosité » des sols, et sont fréquemment utilisés pour l'étude du couvert forestier[5].

12.4. CARTOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS PAR IMAGEUR OPTIQUE HR

Paramètre	**Cartographie des bassins versants**
Type de technologie	**Imageur optique haute-résolution** **Prise d'images programmée et niveaux de zoom possibles**
Instrument(s) embarqué(s)	Actuel : Imageurs optiques à haute et très haute résolution spatiale tels que SPOT-5/6, Landsat 7/8, RapidEye, Alos-1, Aster, Deimos, Pléiades (1A et 1B), GeoEye-1 (GeoEye-2 en 2013), Quickbird, Ikonos, Worldview, Cartosat-1, Cartosat-2, Formosat-2 Futur : Spot-7, Sentinel 2A (2014) et 2B (2016)
Mode de production	Description au sol des états de surface, utilisation de photos aériennes couplées LIDAR pour la cartographie des états de surface et utilisation des modèles numériques de terrain (MNT) issus du LIDAR ou de levés terrains par GPS différentiel ou par photo restitution pour l'analyse du relief, modélisation et SIG.

[5] Un travail important a été réalisé par les équipes de l'INRA,, du BRGM, et des experts du CNES de l'équipe de D. Vidal-Madjar sur le exploitation des series temporelles SAR (référence..XXXX). Ces techniques son intéressantes pour le suivi des variations interannuelles des bassins. L'imagerie optique reste le moyen le plus utilisé pour la cartographie des bassins versants.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

Maturité	Technologie mature, améliorations à venir pour améliorer la cartographie de l'état de surface afin de s'affranchir des descriptions au sol (problèmes d'accès)
Perspective	Amélioration de la résolution spatiale des capteurs optiques
Automatisation	Déjà fortement automatisé
Données associées	Cartographie de terrain
Domaine d'observation	Mondial
Résolution spatiale	Actuelle : Quelques mètres à 0,7 m Future : 0,3 – 0,5m
Résolution temporelle	Le temps de revisite, de l'ordre quelques jours, n'est pas un facteur limitant pour cette application.
Précision	Actuelle : Précision de quelques mètres à 0,7 m (centimétrique avec les LIDAR aéroportés) Futures : 0,3 – 0,5m
Format des données	Image satellites, base de données numériques géo référencées
Accès données	▪ Images d'archives, ▪ Possibilité de programmation d'images selon le type d'images ▪ Accès libre et gratuit pour quelques produits (ex données Landsat) via les agences spatiales pour les données ▪ Accès payant pour la plupart de ces données via les sociétés commerciales de distribution de données
Pérennité des données	Bonne car de nombreuses missions optiques sont prévues dans les années à venir. Instruments en vol pour au-delà de 2022
Délais de mise à disposition	J+3 pour des images d'archive, non déterminé pour les images programmées, concernant le données topographiques, les délais sont fonction et varient selon l'étendue et la localisation de la zone d'étude, des délais d'obtention des autorisations (pays non coopératif, zone transfrontalière, autorisation de vol)
Contraintes à l'utilisation	Couverture végétale importante gênant la photo interprétation des images, couverture nuageuse quasi permanente de certaines zones, Topographie du milieu obligatoire.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

12.5. CARTOGRAPHIE DES ETENDUES D'EAU PAR IMAGERIE SAR

Cette cartographie est plutôt axée sur l'étude de la dynamique des plans d'eau (lacs, réservoirs de surface, tronçons de fleuve), des zones humides et des zones inondées. Il s'agit de déterminer les contours, d'estimer les surfaces d'eau, et par croisement avec d'autres techniques d'estimer les volumes d'eau.

Les utilisations sont diverses :

- Cartographie et suivi des zones humides
- Cartographie et suivi des retenu collinaires des lacs et réservoirs (lacs de montagne, retenues collinaires…)
- Ressource en eau : cartographie des plans d'eau à l'échelle d'une région et estimation des niveaux et des stocks d'eau disponibles.

Paramètre	**Cartographie des étendues d'eau**
Type de technologie	**Radar imageur SAR** Prise d'images programmée, différents angles d'incidence et niveaux de zoom possibles
Instrument(s) embarqué(s)	Radar SAR sur satellites : Passé : ALOS, ENVISAT, ERS, RadarSAT 1… Actuel : constellation Cosmo-Skymed (CSK), RadarSat2, TerraSAR-X (TSX)… Futur : RCM, Sentinel 1A/B)…
Mode de production	Cette cartographie est réalisée par des techniques de segmentation/classification en bonne partie automatisable dont le choix dépend de l'objectif visé. Les applications ciblant l'estimation les niveaux d'eau et les volumes nécessitent une précision maximale sur la détermination de contours fermés des plans d'eau. Il s'agit dans tous les cas de traiter une image projetée au sol et géo-référencée. La projection est souvent réalisée par défaut sur l'ellipsoïde WGS84. Concernant les miroirs d'eau, comme la projection est faite sur l'ellipsoïde et non à la vraie hauteur du réservoir, de faibles déformations de contour liées à la projection peuvent exister. L'ortho-rectification n'est pas nécessaire car les surfaces d'eau (planes) ne génèrent pas de compressions/dilatations de distances dans le mécanisme imageur radar.
Maturité	Segmentations matures (optimisation des algorithmes à réaliser dans un langage plus adapté pour la deuxième méthode), à coupler avec une technique de classification qui puisse s'adapter aux variations de contraste au sein de la fauchée. Des essais restent à faire en pleine résolution ou faible moyennage pour la technique EM. La technique de segmentation itérative de type EM (Expectation / Maximisation) assez performante et rapide est utilisée. La segmentation EM permet une séparation itérative des différents modes de l'histogramme des niveaux de gris dans l'image. La délinéation est ensuite appliquée aux régions segmentées. Celle-ci nécessite une réduction du speckle (par moyennage) qui introduit une imprécision de localisation des contours.
Perspective	Le prototype d'une technique de segmentation automatique a été réalisé (moyennant l'hypothèse de loi Gamma dont l'ordre peut être forcé ou estimé), en pleine résolution, d'images perturbées par du speckle. Cette technique est basée sur une partition déformable (grille polygonale) par itérations successives où les évolutions souhaitées de la grille sont testées par un critère de complexité stochastique qui vise à garder dans chaque zone les pixels qui rendent sa statistique homogène. Le code actuel donne de bons résultats mais est lent (langage IDL). Cet algorithme peut et doit être couplé à une étape de classification / fusion pour ne conserver que le nombre souhaité de classes.
Automatisation	Automatisation facile pour la segmentation mais plus délicate pour la classification.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

Données associées	Pour la cartographie, aucune (après calibration/apprentissage du classifieur). pour la mesure de hauteur, surface et volume nécessite des modèles géomorphologiques et/ou des MNT précis.
Domaine d'observation	Mondial, sous les fauchées des satellites, sauf montagnes abruptes (layover).
Résolution spatiale	Actuelle : elle dépend du capteur exploité et du mode d'acquisition programmé. Des résolutions de quelques mètres à quelques dizaines de mètres sont disponibles et permettent de cartographier des petits plans d'eau[6]. Future : 5m x 5m (pleine résolution Sentinel1), avec un code de segmentation optimal.
Résolution temporelle	Actuelle : Variable selon latitudes : entre 1j (revisite inexacte) à 35j (revisite exacte) Future : Variable selon latitudes : entre 1j (revisite inexacte) à 12j (revisite exacte) de Sentinel-1
Format des données	Cartes de contour et surface des étendues d'eau
Accès données	Accès contraint (car on doit acheter les données, convention GEOS Libre dans le futur avec Sentinel
Pérennité données	une dizaine de satellites programmés ou considérés, instruments en vol jusqu'en 2025.
Délais de mise à disposition	H + 1 sur les données reçues par antenne privée type VIGISAT, sinon cela dépend du Processing and Archive Center (PAC) pour les zones hors Europe
Contraintes à l'utilisation	La présence de végétation aquatique induit des erreurs sur la segmentation automatique et donc sur l'estimation des contours. Les vents forts sur les plans d'eau qui limitent le contraste eau/sol sur l'image rétrodiffusée Comme l'usage d'images haute-résolution est requise pour les applications en hydrologie, et que ces images ont une fauchée réduite, suivant les dimensions de la région à cartographier, le nombre d'images à acquérir peut induire des coûts significatifs et devenir un facteur limitant. La haute résolution offerte par Sentinel1 (StripMap mode) étant comparable à la haute résolution RADARSAT2, pour un faible coût et une fauchée supérieure (80km au lieu de 50km), cette technologie devient nettement plus accessible avec cette mission à condition que le plan d'acquisition introduise bien le mode StripMap au dessus des zones d'intérêt pour l'hydrologie.

[6] Pour une étendue à cartographier donnée, la taille minimum des plans d'eau que l'on souhaite observer est déterminante, car le nombre d'images à acquérir (et donc le coût) augmente rapidement avec la résolution nécessaire pour détecter ces objets.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

12.6. OCCUPATION DU SOL DES BASSINS VERSANTS PAR IMAGEUR OPTIQUE

Paramètre	Cartographie des bassins versants
Type de technologie	**Imageur optique haute-résolution** Prise d'images programmée et niveaux de zoom possibles
Instrument(s) embarqué(s)	Actuel : Imageurs optiques à haute et très haute résolution spatiale tels que SPOT-5/6, Landsat 7/8, RapidEye, Alos-1, Aster, Deimos, Pléiades (1A et 1B), GeoEye-1 (GeoEye-2 en 2013), Quickbird, Ikonos, Worldview, Cartosat-1, Cartosat-2, Formosat-2 Futur : Spot-7, Sentinel 2A (2014) et 2B (2016)
Mode de production	Le développement conjugué de l'informatique et des applications commerciales des technologies spatiales ont ouvert depuis quelques années, un vaste champ d'application. Tous les grands programmes de connaissance et de suivi des écosystèmes, des activités humaines ont adopté une méthodologie reposant sur l'utilisation de données satellitaires. Actuel : Classification des images satellites, photo-interprétation assistée par ordinateur,
Maturité	Technologie mature et éprouvée depuis de nombreuses années, améliorations à venir pour améliorer la cartographie de l'état de surface entre autre par le développement des classifications dites ''objets''
Perspective	Amélioration de la résolution spatiale des capteurs optiques et des techniques de classification.
Automatisation	Pour les classifications simples de nombreux outils existent. La classification ne peut cependant pas être considéré comme un processus automatique il requiert expertise et corrélation avec une vérité terrain pour étalonnage et réglages algorithmiques adaptés à la situation particulière analysée.
Données associées	Données topographiques, vérité terrain pour étalonnage et réglages algorithmiques
Résolution spatiale	De 30 mètres à 0.5 mètre
Résolution temporelle	En fonction du type d'étude
Précision	Variable selon le type de capteur et le type de produit : de 2 m à quelques mètres
Format des données	Images satellites optiques géoréférencées
Accès données	▪ Images d'archives, ▪ Possibilité de programmation d'images selon le type d'images ▪ Accès libre et gratuit pour quelques produits (ex données Landsat) via les agences spatiales pour les données Accès payant pour la plupart de ces données via les sociétés commerciales de distribution de données
Délais de mise à disposition	J+3 pour des images d'archive, non déterminé pour les images programmées
Contraintes à l'utilisation	Couverture nuageuse quasi permanente de certaines zones, pollution atmosphérique sur les grands centres urbains

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

13. TOPOGRAPHIE ET BATHYMETRIE

13.1. DEFINITIONS

La topographie du bassin versant, puis celle des cours d'eau (topographie du lit mineur et majeur), bathymétrie des cours d'eau et plan d'eau sont la base de toute activité hydrologique et/ou hydraulique. C'est ce qui va déterminer les écoulements, les possibilités de stockage de l'eau, le fonctionnement des cours d'eau.

13.2. UTILISATION

- Détermination du réseau hydrologique
- Détermination de la réactivité du bassin
- Détermination des zones inondables
- Détermination du stock d'eau, du tirant d'eau

13.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

- Imageur optique HR (high utility)
- Imageur radar SAR (high utility)
- Radar altimètre, intéressant en « Z », mais résolution spatiale de la centaine de mètres au mieux
- Radiomètre imageur multi-spectral (VIS/IR) (high utility).

13.4. TOPOGRAPHIE PAR IMAGEUR OPTIQUE HAUTE-RESOLUTION

Paramètre	Topographie (Cartographie des bassins versants)
Type de technologie	**Imageur optique haute-résolution** Prise d'images programmée et niveaux de zoom possibles
Instrument(s) embarqué(s)	Imagerie optique à haute résolution spatiale (HRS) SPOT-5, PLEIADES, GeoEye-1 (GeoEye-2 en 2013)
Mode de production	Traitement stéréographique à partir de plusieurs images de la même zone sous plusieurs incidences afin de déterminer la topographie du terrain.
Maturité	Technologie mature et éprouvée depuis de nombreuses années, améliorations à venir pour améliorer la précision des MNT en XY et Z
Perspective	Remplacement des photos aériennes par des images THR, reste la question de remplacer le LIDAR aéroporté par un LIDAR embarqué sur satellite
Automatisation	De nombreux outils informatiques existent déjà
Données associées	Données topographiques (LIDAR, levés terrains, GPS différentiel, photo restitution)
Domaine d'observation	Mondial
Résolution spatiale	~10 mètres
Résolution temporelle	Dépendante de la programmation d'images (et du coût). Possibilité d'effectuer un MNT sur un seul passage satellite.
Précision	Dépend du capteur et des conditions d'acquisitions B/H (la précision souhaitée est de

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

	1/200 de la taille du bassin versant).
Format des données	Base de données numériques géoréférencées
Accès données	Accès libre aux données sources via les agences spatiales, produit MNT finis, payant via les prestataires de service.
Pérennité des données	Bonne
Délais de mise à disposition	J+1 à J+5 selon les zones et étendues des zones d'étude
Contraintes à l'utilisation	Actuellement, limitations dans les zones urbaines et zones de montagnes (zones d'ombre. Importance d'effectuer du calage au sol.

13.5. BATHYMETRIE PAR IMAGEUR OPTIQUE HAUTE-RESOLUTION

Paramètre	Bathymétrie
Type de technologie	**Imageur optique haute-résolution** Prise d'images programmée et niveaux de zoom possibles
Instrument(s) embarqué(s)	Imagerie optique à haute résolution spatiale (HRS) SPOT-5, 6, 7, PLEIADES Landsat, RapidEye, GeoEye-1 (GeoEye-2 en 2013), LDCM, Deimos, Worldview et Sentinel2…
Mode de production	La bathymétrie pour des fonds sableux est obtenue par inversion du signal de réflectance d'images optiques haute résolution (HRS) via un modèle semi-analytique fonction de la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau. Méthode : ajustement du Quasi-Analytical Algorithm (Lee et al., 2002) pour applications aux capteurs HRS. *Opérationnel de +3m à environ -6m, suivant la clarté de l'eau.*
Maturité	Moyenne pour l'opérationnel. Nécessité de calibration pour améliorer les précisions. Relevé possible, avéré, des 6 premiers mètres. Certains fournisseurs (Digital Globe) parlent d'une pénétration à 50 m en eaux tropicales claires
Perspective	Assez bonne car la technologie en mode recherche est prometteuse.
Automatisation	Automatique (avec ou sans calibration)
Données associées	Données de calibration in-situ pour améliorer la précision
Domaine d'observation	Mondial
Résolution spatiale	Actuelle : 10m (Spot-5, archives), 6,5m (RapidEye), 5m (SPOT-5), 6,5m (RapidEye), 0,7m (Pléiades), 2 m annoncé par Digital Globe
Résolution temporelle	Quelques jours (suffisant pour ces études)
Précision	0,30 à 0,40m avec calibration in-situ, 0,8m sans calibration in-situ

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

Format des données	Cartes bathymétriques (raster), positions des bancs de sable
Accès données	Restreint, achat d'images
Pérennité des données	Instruments en vol pour au-delà de 2022
Délais de mise à disposition	J + 1 à 2 jours de traitement
Contraintes à l'utilisation	▪ La turbidité de l'eau limite la pénétration des signaux optiques. Pour cette raison, la méthode n'a pas pu être appliquée dans l'estuaire de la Gironde. ▪ Même contrainte en fleuve ou en rivière. Intérêt cependant pour les déplacements de bancs de sable affleurant.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

14. DEPLACEMENT DES SOLS ET INFRASTRUCTURES

14.1. DEFINITION

Observation des déplacements verticaux des sols à des échelles de quelques mm à quelques cm.

14.2. UTILISATIONS

- Suivi des mouvements de terrain en zones sensibles : mines, réservoirs souterrains
- Evolution des aquifères
- Tenue des ouvrages d'art et des sols environnant

14.3. TECHNOLOGIES SPATIALES

La technologie utilisée est le radar imageur SAR.

14.4. DEPLACEMENTS DES SOLS ET INFRASTRUCTRES PAR RADAR IMAGEUR SAR

Paramètre	Déplacement des sols et infrastructures
Type de technologie	**Radar imageur SAR - Interférométrie InSAR** Prise d'images programmée, différents angles d'incidence et niveaux de zoom possibles
Instrument(s) embarqué(s)	SAR interféromètre
Mode de production	Actuel : SAR Interféromètre, classique et PSI (Persistent Scatterer Interferometry) utilisant la phase du signal pour des déplacements millimétriques et centimétriques. Corrélation d'amplitude pour des mouvements métriques. Un jeu de 10 à 20 images est utilisé pour la définition d'un état initial. Les images suivantes fournissent les variations de niveau par rapport à cet état initial.
Maturité	La technologie est utilisée depuis 15 ans. La qualité des résultats a été démontrée avec un grand nombre de projets industriels.
Utilisation actuelle	Pour le suivi des mouvements de terrain en zones sensibles (zones urbaines, oil & gas, mines…).
Perspective	Combinaison de différentes bandes électromagnétiques (L, C et X) pour contrôler les zones de même intérêt. Amélioration de la résolution spatiale et de la fréquence temporelle des acquisitions satellite
Automatisation	La plupart des process sont automatiquesmais l'intervention d'un analyste expert des images est recommandée
Application à l'international	De grandes zones peuvent être suivies sans données in situ
Données associées	MNT précis et des photos ortho-rectifiées (mais non nécessaires).
Domaine d'observation	Mondial, sous les traces des satellites (pinceau de 30-100 km au range).
Résolution spatiale	Actuelle : 1 à 3m, Future : <1m
Résolution temporelle	Par l'utilisation d'une constellation de satellites, 1 acquisition tous les 4 jours dans le meilleur des cas
Précision	1-2 mm/an (vitesse de déformation des sols)

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES

Format des données	Images SAR + rapports d'interprétation
Accès données	▪ Accès restreint, services commerciaux (données payantes). ▪ Historique des données : depuis 1992 (ERS) ▪ Sources : agences spatiales, Infoterra, e-Geos…
Pérennité des données	Bonne, une dizaine de satellites programmés ou considérés, des instruments en vol jusqu'en 2025.
Délais de mise à disposition	Actuelle : J + 4 semaines, Future : J + 2 semaines
Contraintes à l'utilisation	La densité des points de mesures dépend de la décorrélation temporelle, des caractéristiques du terrain et de la période temporelle de l'étude.

Document CNES dont le contenu ne peut être diffusé sans l'autorisation explicite du CNES