



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

CATALOGUE DES FICHES TECHNO



## Table des matières

<b>1. PLUVIOMETRIE</b> .....	<b>4</b>
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
<b>2. EVAPORATION ET EVAPOTRANSPIRATION</b> .....	<b>7</b>
2.1. DEFINITION.....	7
2.2. UTILISATIONS .....	7
2.3. TECHNOLOGIES SPATIALES.....	7
2.4. LIMITATIONS ET CONTRAINTES .....	7
<b>3. NIVEAU D’EAU</b> .....	<b>8</b>
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
<b>4. VITESSE DE COURANT DE SURFACE</b> .....	<b>13</b>
4.1. DEFINITION.....	13
4.2. UTILISATIONS .....	13
4.3. TECHNOLOGIES SPATIALES.....	13
<b>5. DEBIT</b> .....	<b>13</b>
5.1. DEFINITION.....	13
5.2. UTILISATIONS .....	14
5.3. TECHNOLOGIES SPATIALES.....	14
5.4. DEBIT PAR TARAGE ET HAUTEURS ALTIMETRIQUES.....	14
<b>6. STOCK EN EAU SOUTERRAINE</b> .....	<b>17</b>
6.1. DEFINITION.....	17
6.2. UTILISATIONS .....	17
6.3. TECHNOLOGIES SPATIALES.....	17
6.4. STOCK D’EAU SOUTERRAINE PAR GRAVIMETRIE.....	17
<b>7. HUMIDITE DE SURFACE DU SOL</b> .....	<b>19</b>
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
<b>8. DEBIT DES FONTES DE NEIGE OU DE GLACE</b> .....	<b>27</b>
8.1. DEFINITION.....	27
8.2. UTILISATIONS .....	27
8.3. TECHNOLOGIES SPATIALES.....	27

8.4. DEBIT DES FONTES DE NEIGE OU DE GLACE EN ZONE MONTAGNEUSE PAR BASSIN VERSANT .....	28
<b>9. QUALITE DE L'EAU (TURBIDITE, COULEUR DE L'EAU, MATIERE EN SUSPENSION TOTALE) .....</b>	<b>30</b>
9.1. DEFINITION.....	30
9.2. UTILISATIONS .....	30
9.3. TECHNOLOGIES SPATIALES.....	30
9.4. QUALITE DE L'EAU PAR IMAGERIE VIS/NIR .....	30
<b>10. TEMPERATURE DES EAUX DE SURFACE .....</b>	<b>32</b>
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
<b>11. VENT DE SURFACE .....</b>	<b>34</b>
11.1. DEFINITION .....	34
11.2. UTILISATIONS.....	34
11.3. TECHNOLOGIES SPATIALES .....	34
11.4. VENT DE SURFACE PAR RADAR IMAGEUR SAR.....	34
<b>12. CARTOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS .....</b>	<b>36</b>
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
<b>13. TOPOGRAPHIE ET BATHYMETRIE .....</b>	<b>41</b>
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
<b>14. DEPLACEMENT DES SOLS ET INFRASTRUCTURES .....</b>	<b>44</b>
14.1. DEFINITION .....	44
14.2. UTILISATIONS.....	44
14.3. TECHNOLOGIES SPATIALES .....	44
14.4. DEPLACEMENTS DES SOLS ET INFRASTRUCTURES PAR RADAR IMAGEUR SAR.....	44

# 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 SSM/I (US), AMSR-E (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

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

- Les radars météorologiques font une apparition remarquable 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://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/background.html)
  - [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation/additional/instruments/trmm\\_instr.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation/additional/instruments/trmm_instr.shtml)[http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM\\_V6.3B42\\_daily.2.shtml](http://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](http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/index_e.htm)

## 1.5. PLUVIOMETRIE OBTENUE PAR RADIOMETRIE VIS/R

<b>Paramètre</b>	<b>Précipitations</b>
<b>Type de technologie</b>	<b>Radiométrie VIS/IR sur satellites géostationnaires</b> <b>Observation d'un disque terrestre</b>
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	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)...
<b>Mode de production</b>	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.
<b>Maturité</b>	Technologie mature la plus utilisée à ce jour et utilisée depuis de nombreuses années
<b>Perspective</b>	C'est le travail des agences météorologiques d'améliorer et de fournir les bons produits
<b>Automatisation</b>	Produit complexe développé par les agences météorologiques
<b>Données associées</b>	Données météorologiques (modèles)
<b>Domaine d'observation</b>	Couverture spatiale des technologies satellites utilisées (mondiale, globale sans les pôles, régionale, observations sous traces fixes...).
<b>Résolution spatiale</b>	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 3 <sup>ième</sup> génération (MTG), 0,5 km en VIS et 2 km en IR sur les futurs satellites GOES (R et S) à partir de 2015.
<b>Résolution temporelle</b>	Une mesure toutes les 15 mn avec les satellites MSG au lieu de 30 mn avec les satellites Meteosat 1 <sup>ère</sup> génération :
<b>Format des données</b>	Base de données numériques (NetCDF), cartes de précipitations moyennes (sites de la NOAA)
<b>Accès données</b>	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)  <a href="http://www.ssd.noaa.gov/PS/PCPN/HE.html">http://www.ssd.noaa.gov/PS/PCPN/HE.html</a>  <a href="http://www.eumetsat.int/Home/Main/DataProducts/Atmosphere/index.htm?l=en">http://www.eumetsat.int/Home/Main/DataProducts/Atmosphere/index.htm?l=en</a>
<b>Pérennité des données</b>	Bonne, continuité des satellites américains (GOES), européens (Meteosat), chinois (FY) programmés jusque dans les années 2030
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	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.

## 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 1/10<sup>ième</sup> 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.

## 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 télémessure 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.



### 3.4. NIVEAU D'EAU DES GRANDS FLEUVES

<b>Paramètre</b>	<b>Niveau d'eau des grands fleuves</b>
<b>Type de technologie</b>	<b>Altimétrie Radar</b> <b>Observation continue au nadir</b>
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	<p>Radar altimètre sur les satellites :</p> <p>Passé : ERS (Europe), TOPEX/Poseidon (USA/France), Envisat (Europe)<sup>1</sup>, GFO (USA), HY-2A (Chine)</p> <p>Actuel : Jason-1, Jason-2 (USA/France) et SARAL-Altika (Inde/France) ; Cryosat2 (Europe - altimétrie SAR).</p> <p>Futur : Sentinel-3 A&amp; B (Europe), HY-2B (Chine), Jason-3, Jason CS...</p> <p>Lidar, altimétrie laser sur ICESat-2 (USA; 2016) suite à l'expérience ICESat-I</p> <p>Radar interférométrique avec la mission SWOT (USA/France, 2020)</p>
<b>Mode de production</b>	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.
<b>Maturité</b>	<p>Technologie mature, améliorations à venir sur l'extraction du signal eau sur fleuve plus étroit et plus « bruité » par le relief des berges.</p> <p>Le niveau des océans est l'utilisation actuelle principale de l'altimétrie. La technologie a été étendue aux grands fleuves.</p>
<b>Perspective</b>	<p>Utilisation renforcée sur les fleuves, rivières.</p> <p>Amélioration très significative avec la future mission SWOT</p>
<b>Automatisation</b>	<p>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.</p> <p>Pour des contextes moins favorables, on doit recourir à une analyse humaine pour affiner les résultats.</p>
<b>Données associées</b>	<p>Aucune, dans les cas simples.</p> <p>Connaissance préalable des niveaux de référence de l'eau, de la topographie.</p>
<b>Domaine d'observation</b>	<p>A ce jour uniquement le long des traces satellites altimètres (pinceau de 5 km au nadir).</p> <p>Pour Jason : entre -66°S et -66°N</p> <p>Pour les autres satellites : couverture quasi globale (quasi couverture des zones Arctique et Antarctique)</p>
<b>Résolution spatiale</b>	<p>Actuelle : Largeur de fleuves 150m au mieux</p> <p>Future : Largeur de fleuves en dessous de 100m (SARAL-Altika, Sentinel-3, Jason-3, SWOT...)</p>
<b>Résolution temporelle</b>	<p>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)</p> <p>Future : Idem pour l'altimétrie conventionnelle, fortement dépendant du nombre de missions en service</p>
<b>Précision</b>	Actuelle : Hauteur relative : 10 à 50 cm

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

	Future : Hauteur relative : 10 à 30 cm
<b>Format des données</b>	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)
<b>Accès données</b>	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... <a href="http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/news-focus/rivers-and-lakes-monitoring-by-altimetry.html">http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/news-focus/rivers-and-lakes-monitoring-by-altimetry.html</a> <a href="http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/">http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/</a> <a href="http://earth.esa.int/riverandlake">http://earth.esa.int/riverandlake</a>
<b>Pérennité des données</b>	Bonne, instruments en vol jusqu'à 2027
<b>Délais de mise à disposition</b>	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).
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	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

### 3.5. NIVEAU D'EAU DES LACS

<b>Paramètre</b>	Niveau d'eau des lacs
<b>Type de technologie</b>	<b>Altimétrie Radar</b> <b>Observation continue au nadir</b>
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	<p>Radar altimètre sur les satellites :</p> <p>Passé : ERS (Europe), TOPEX/Poseidon (USA/France), Envisat (Europe)<sup>2</sup>, GFO (USA), HY-2A (Chine)</p> <p>Actuel : Jason-1, Jason-2 (USA/France) et SARAL-Altika (Inde/France) ; Cryosat2 (Europe - altimétrie SAR).</p> <p>Futur : Sentinel-3 A&amp; B (Europe), HY-2B (Chine), Jason-3, Jason CS...</p> <p>Lidar, altimétrie laser sur ICESat-2 (USA; 2016) suite à l'expérience ICESat-I</p> <p>Radar interférométrique avec la mission SWOT (USA/France, 2020)</p>
<b>Mode de production</b>	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.
<b>Maturité</b>	<p>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.</p> <p>Le niveau des océans est l'utilisation actuelle principale de l'altimétrie. La technologie a été étendue aux lacs.</p>
<b>Perspective</b>	<p>Utilisation renforcée sur les lacs voire forêts inondées et mangroves.</p> <p>Amélioration très significative avec la mission future SWOT</p>
<b>Automatisation</b>	<p>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.</p> <p>Pour des contextes moins favorables, on doit recourir à une analyse humaine pour affiner les résultats</p>
<b>Données associées</b>	<p>Aucune, dans les cas simples.</p> <p>Connaissance préalable des niveaux de référence de l'eau, de la topographie.</p>
<b>Domaine d'observation</b>	Mondial, sous les traces des satellites (pinceau de 5 km au nadir).
<b>Résolution spatiale</b>	<p>Actuelle : Dimension de lacs 150m au mieux, si localisé sous trace au sol</p> <p>Future : Dimension de lacs en dessous de 100m (SARAL-Altika, Sentinel-3, Jason-3, SWOT...)</p>
<b>Résolution temporelle</b>	<p>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)</p> <p>Future : Idem pour l'altimétrie conventionnelle, fortement dépendant du nombre de missions en service</p>
<b>Précision</b>	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

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

	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
<b>Format des données</b>	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)
<b>Accès données</b>	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... <a href="http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/news-focus/rivers-and-lakes-monitoring-by-altimetry.html">http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/news-focus/rivers-and-lakes-monitoring-by-altimetry.html</a> <a href="http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/">http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/</a> <a href="http://earth.esa.int/riverandlake">http://earth.esa.int/riverandlake</a>
<b>Pérennité des données</b>	Bonne, instruments en vol jusqu'à 2027
<b>Délais de mise à disposition</b>	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).
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	Topographie du milieu environnant, relief des berges Iles émergées, bancs de sable émergents Variation importante des dimensions du lac sous les traces des satellites entre basses eaux et hautes eaux Echos parasites sur berge très urbanisées

## 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](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 m<sup>3</sup>/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  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] s'écoulant dans une section d'écoulement  $S$  [m<sup>2</sup>] d'une rivière peut être défini à partir de la vitesse moyenne  $V$  [m/s] perpendiculaire à cette section par la relation :

$$Q = V \cdot S.$$

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.

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

<b>Paramètre</b>	Débit par tarage et hauteurs altimétriques
<b>Type de technologie</b>	<b>Altimétrie Radar</b> <b>Observation continue au nadir</b>
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	Radar altimètre sur les satellites : Passé : ERS (Europe), TOPEX/Poseidon (USA/France), Envisat (Europe) <sup>3</sup> , 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)
<b>Mode de production</b>	Obtention du débit à partir d'une courbe de tarage (abaque) et des mesures de niveaux d'eau obtenues par altimétrie)

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

<b>Maturité</b>	L'utilisation de l'altimétrie pour produire des hauteurs d'eau est opérationnelle aux intersections des traces satellites et des fleuves.
<b>Perspective</b>	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.
<b>Automatisation</b>	Possible, mais nécessite la connaissance ou le calcul de paramètres spécifiques à chaque site d'observation
<b>Données associées</b>	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.
<b>Domaine d'observation</b>	Sections de fleuve sous trace satellite altimétrique
<b>Résolution spatiale</b>	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
<b>Résolution temporelle</b>	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
<b>Précision</b>	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
<b>Format des données</b>	Fichiers de données, séries temporelles, graphiques
<b>Accès données</b>	Hauteur d'eau (par altimétrie) : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Accès libre</li> <li>▪ Historique des données : depuis fin 1992 pour l'altimétrie</li> <li>▪ Sources : agences spatiales, HydroWeb, River &amp; Lake...</li> </ul> Géométrie de la section d'écoulement : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ MNT globaux accessibles facilement (Internet)</li> <li>▪ MNT spécifiques sur demande (ex : stéréographie SPOT5)</li> </ul> Délinéation de plans d'eau sur images optique/SAR à la demande
<b>Pérennité des données</b>	Bonne, instruments altimètres en vol jusqu'à 2027
<b>Délais de mise à disposition</b>	Actuelle : A partir de J+1, et la donnée doit être analysée  Future : Mieux qu'actuellement
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesure du débit considérée inaccessible à la mesure spatiale jusqu'à il y a quelques années (évolution difficile des mentalités).</li> <li>▪ Etudes prometteuses sur le sujet</li> </ul>

- 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



## 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

<b>Paramètre</b>	Stock en eau souterraine (Variations du stock en eau souterraine par gravimétrie spatiale)
<b>Type de technologie</b>	<b>Gravimétrie</b> <b>Observation continue</b>
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	GRACE (USA/DE - 2002) et GOCE (Europe - 2009) Futur : Mission GRACE Follow On (USA/DE)
<b>Mode de production</b>	La technique consiste à mesurer les variations du champ de gravimétrie 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.
<b>Maturité</b>	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
<b>Perspective</b>	Moyenne : la résolution spatiale des mesures permettra d'accéder à de petits réservoirs souterrains (de l'ordre de 10kms)
<b>Automatisation</b>	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
<b>Données associées</b>	Variabilité des stocks d'eau superficiels, de manière à les soustraire de la mesure intégrée et accéder aux stocks en eau souterraine.
<b>Résolution spatiale</b>	Actuelle : modèle résolution :100 à 150 km au mieux,

	Future : quelques dizaines de kilomètres au mieux
<b>Résolution temporelle</b>	mensuelle, cartes tous les 10 jours produites par le GRGS
<b>Précision</b>	Actuelle : quelques cm en équivalent de hauteur d'eau
<b>Format des données</b>	Produits experts. Exemple : cartes mensuelles du champ de gravité
<b>Accès données</b>	Via les agences spatiales et laboratoires de recherche <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <a href="http://www.legos.obs-mip.fr/produits/grand-public/les-principaux-produits/grace">http://www.legos.obs-mip.fr/produits/grand-public/les-principaux-produits/grace</a></li> </ul>
<b>Pérennité des données</b>	Moyenne à faible (GOCE en fin de mission), GRACE FO (2017-2022), GRACE-II (2030-2033)
<b>Délais de mise à disposition</b>	Actuels : J+quelques semaines
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	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.

## 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 influencer 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/cm<sup>3</sup>) ou volumétriques (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), 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 régulières 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 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

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)

<b>Paramètre</b>	Humidité de surface du sol (indice)
<b>Type de technologie</b>	<b>Radar imageur SAR (Small Aperture Radar)</b> Prise d'images programmées, différents angles d'incidence et niveaux de zoom possibles
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	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...
<b>Mode de production</b>	<p>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).</p> <p>La mesure restituée est le coefficient de rétrodiffusion(<math>\sigma_0</math>) 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 réfléchi « 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.</p> <p>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.</p> <p>La difficulté inhérente aux mesures d'humidité par radar SAR tient donc à :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 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.</li> <li>• la constante diélectrique varie souvent à de petites échelles.</li> <li>• 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.</li> <li>• Enfin le signal est affecté par le « speckle* »</li> </ul> <p>En conséquence, les mesures radar ne sont utilisées que comme indice pour évaluer les changements d'une image à une autre.</p>

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 est 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.*

<b>Maturité</b>	Moyenne pour l'indice. Utilisation par les chercheurs comme indice de variation. La résolution spatiale est intéressante. Requier des prises d'images fréquentes (impact prix, envisageable avec les données de Sentinel 1 et 2 qui seront en accès libre).
<b>Perspective</b>	Pas de grande évolution en vue à ce stade
<b>Automatisation</b>	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.
<b>Données associées</b>	Type de sols (nature et occupation des sols), données <i>in situ</i> de calibration
<b>Domaine d'observation</b>	Mondial, car les satellites embarquant des instruments SAR couvrent le globe, mais le nombre d'images est réduit.
<b>Résolution spatiale</b>	Quelques mètres à 100 m
<b>Résolution temporelle</b>	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.
<b>Précision</b>	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 $\sigma_0$ localement avec des coins réflecteurs. On peut espérer 4 à 5 niveaux d'humidité.
<b>Format des données</b>	Format sous forme de bases de données numériques géoréférencées
<b>Accès données</b>	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
<b>Pérennité des données</b>	Bonne, une dizaine de satellites programmés ou considérés, des instruments en vol jusqu'en 2025.
<b>Délais de mise à disposition</b>	Quelques heures pour l'image seule.
<b>Contraintes à</b>	Le signal est au moins autant sensible à la rugosité de la surface (feuilles, troncs,

**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.

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

<b>Paramètre</b>	Humidité de surface du sol (indice)
<b>Type de technologie</b>	<b>Diffusiométrie radar (scatterometers) en bande-C</b> Observation continue, latérale (side-looking) de bandes de ~ 100 km,
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	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
<b>Mode de production</b>	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 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• les observations des diffusiomètres embarqués sont continues (nul besoin de les commander) et donc très fréquentes. Les historiques sont donc facilement constitués.</li> <li>• 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.</li> <li>• les signaux des deux images sont moyennés ce qui rend l'image résultante moins sensible au speckle* et à la végétation.</li> </ul> <p><i>*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.</i></p>
<b>Maturité</b>	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.
<b>Automatisation</b>	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.
<b>Données associées</b>	Type de sols (nature et occupation des sols)
<b>Domaine d'observation</b>	Mondial, car les satellites embarquant des radars diffusiomètres couvrent le globe.
<b>Résolution spatiale</b>	25 à 50 kilomètres
<b>Résolution temporelle</b>	Quelques jours
<b>Précision</b>	Une variation d'~1 dB sur le signal conduit à des variations de l'ordre de 20% sur l'indice.
<b>Format des données</b>	Indice (entre 0 et 100%) sous forme de fichiers numériques (GTS BUFR, NetCDF...) Détail des produits et des formats : <a href="http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/eps-pg/ASCAT/ASCAT-PG-6ProdFormDis.htm#TOC61">http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/eps-pg/ASCAT/ASCAT-PG-6ProdFormDis.htm#TOC61</a>
<b>Accès données</b>	Libre (EumetSat H-SAF) <a href="http://www.eumetsat.int/Home/Main/DataProducts/Land/index.htm?!=en">http://www.eumetsat.int/Home/Main/DataProducts/Land/index.htm?!=en</a>

	Dissémination via le GTS
<b>Pérennité des données</b>	Moyenne, quelques instruments en vol jusqu'en 2021.
<b>Délais de mise à disposition</b>	Quelques jours
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	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.



## 7.6. HUMIDITE DU SOL PAR RADIOMETRIE MICRO-ONDES

<b>Paramètre</b>	Humidité du sol
<b>Type de technologie</b>	<b>Radiométrie micro-ondes</b> <b>Observation continue, balayage transverse de bandes de plus de 1000km</b>
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	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,
<b>Mode de production</b>	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 ( <i>best fit</i> ), est déduit la valeur de la constante diélectrique optimale et l'humidité du sol associée.
<b>Maturité</b>	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 chaîne de réception ou des traitements au sol permettent de réduire l'impact de ces perturbations.
<b>Perspective</b>	SMAP en 2014(USA), GCOM-W2 en 2016 et GCOM-W3 en 2020 (Japon) SMOS Next à l'étude, ainsi qu'un satellite Chinois.
<b>Automatisation</b>	Complète
<b>Données associées</b>	Type de sol (FAO), Température physique (ECMWF), occupation des sols - couvert végétal (Ecoclimap).
<b>Domaine d'observation</b>	Mondial
<b>Résolution spatiale</b>	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).
<b>Résolution temporelle</b>	2 images tous les 3 jours à l'équateur (6 heures et 18 heures). Couverture quasi quotidienne à 47° de latitude
<b>Précision</b>	De l'ordre de 0,06 m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> mais dépend du type de sol et de végétation (meilleur pour faible couverture végétale, moins bonne sous végétation dense (forêts)
<b>Format des données</b>	Formats NetCDF, Bin Hex

<b>Accès données</b>	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
<b>Pérennité des données</b>	Moyenne, SMOS, GCOM-W1 aujourd'hui, SMAP(2014), GCOM-W1-W2 à l'étude. Instruments en vol jusqu'en 2022
<b>Délais de mise à disposition</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Données NRT (Near Real Time, quasi-réel) : &lt;180 mn</li><li>• Données finalisées : à J+1</li></ul>
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	Technologie encore peu connue donc peu utilisée

## 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/data/ae_5dsno.html) <http://nsidc.org/>, [http://nsidc.org/research/projects/Armstrong\\_AMSR-E\\_Validation.html](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 Horwath<sup>1,2,\*</sup>, Benoît Legrésy<sup>1</sup>, Frédérique Rémy<sup>1</sup>, Fabien Blarel<sup>1</sup>, 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](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 :

- 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

<b>Paramètre</b>	<b>Débit des fontes de neige ou de glace en zone montagneuse par bassin versant</b>
<b>Type de technologie</b>	<b>Radiomètre Vis/IR</b> <b>Observation continue, balayage transverse</b>
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	Modis, ETM (Landsat), Vegetation (Spot 4 <sup>4</sup> , 5, 6), Proba-V, Sentinel-2, 3, Suomi, LDCM....
<b>Mode de production</b>	<p>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.</p> <p>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 <i>temperature index model</i>) par tranche d'altitude et de multiplier cette lame de fonte par la surface enneigée vue par satellite (modèle SRM par exemple).</p> <p>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.</p> <p>Evolution. future : Assimilation haute fréquence et haute résolution spatiale de la surface enneigée dans un modèle distribué du bilan d'énergie du manteau neigeux</p>
<b>Maturité</b>	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.
<b>Données associées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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).</li> <li>• Température de l'air (elle peut être estimée par des sorties de modèles météo en l'absence de stations de mesure in-situ)</li> </ul>
<b>Résolution spatiale</b>	<p><b>Actuelle</b></p> <p>MODIS 250-500 m de résolution</p> <p>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.</p> <p>VGT (sur SPOT), 1 km de résolution, fréquence revisite minimum 1j (temps de</p>

<sup>4</sup> Spot-4 a été désorbité en fin juin 2013.

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)

<b>Résolution temporelle</b>	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)
<b>Précision</b>	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. <i>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)</i>
<b>Format des données</b>	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))
<b>Accès données</b>	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) <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/data/">http://modis.gsfc.nasa.gov/data/</a>
<b>Pérennité des données</b>	Très bonne, nombreux instruments prévus, certains encore en vol après 2030 (série MTG-I 1, 2, 3, 4)
<b>Délais de mise à disposition</b>	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
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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)</li> <li>• 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).</li> <li>• 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.</li> </ul>

## 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

<b>Paramètre</b>	Qualité de l'eau (Turbidité, couleur de l'eau, matière en suspension totale)
<b>Type de technologie</b>	<b>Imagerie Vis/NIR</b> <b>Observation continue, balayage transverse ou prise d'images programmée (HR), niveaux de zoom possibles</b>
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	Passé : MERIS (ENVISAT), rappelé ici pour l'intérêt de sa base archive pour, par ex., qualifier l'eutrophisation 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
<b>Mode de production</b>	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
<b>Maturité</b>	Très bonne sur océan, maîtrise moins répandue sur eaux continentales à part sur grands estuaires et bassins (Bassin d'Arcachon...)
<b>Perspective</b>	Application sur fleuves et lacs des technologies développée sur océan avec des résolutions adaptées
<b>Automatisation</b>	Bonne sur océans. Besoin fort d'étalonnage in situ pour les eaux continentales
<b>Données associées</b>	Etalonnage in situ, Masque des plans d'eau, Corrections atmosphériques

<b>Résolution spatiale</b>	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.
<b>Résolution temporelle</b>	Environ journalière : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ impactée par la présence de nébulosité</li> </ul>
<b>Précision</b>	Actuelle : de l'ordre de 50 mg/l pour la matière en suspension totale mesurée avec MODIS sur l'Amazone
<b>Format des données</b>	Images dans différentes bandes spectrales, éventuellement à composer
<b>Accès données</b>	Actuel : MODIS : libre, <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/data/">http://modis.gsfc.nasa.gov/data/</a> Optique haute résolution: service commercial, images à commander. Cet accès sera facilité dans le futur avec Sentinel 2 et 3.
<b>Pérennité des données</b>	Très bonne, un grand nombre de satellite, instruments en vol au delà de 2035 déjà planifiés
<b>Délais de mise à disposition</b>	J+0 pour MODIS, équivalent pour l'optique commerciale
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Besoin d'étalonnage/calibration in situ pour les eaux continentales.</li> <li>▪ Problème de la nébulosité</li> <li>▪ Utilisation de MODIS réservée aux plans d'eau suffisamment étendus</li> <li>▪ Amélioration attendue avec les imageurs HR des Sentinel 2 et 3</li> </ul>

## 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 entraîner 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

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



<b>données</b>	Cartes de température de surface préparées par organisme spécialisé
<b>Accès données</b>	MODIS en accès libre <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/data/">http://modis.gsfc.nasa.gov/data/</a>
<b>Pérennité des données</b>	Très bonne, plusieurs missions satellites étant prévues dans les années à venir. Instruments en vol (prévus) pour au-delà de 2035.
<b>Délais de mise à disposition</b>	J+0 pour MODIS
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Présence de nuages. Sur océans, des algorithmes existent pour limiter l'impact des nuages.</li><li>▪ Seuls les grands plans d'eau sont observables pour l'instant.</li></ul>

## 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

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

	Résolution améliorée en combinant plusieurs missions
<b>Précision</b>	RMS : 1.5-2.0 m/s
<b>Format des données</b>	Format sous forme de bases de données numériques géoréférencées
<b>Accès données</b>	Restreint (payant) sur les missions actuelles
<b>Pérennité des données</b>	Bonne, une dizaine de satellites programmés ou considérés, des instruments en vol jusqu'en 2025.
<b>Délais de mise à disposition</b>	Actuel : Pas d'accès libre mais peut-être du temps réel (<15min) Futur : J+24h
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	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)

## 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<sup>5</sup>.

### 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.

<sup>5</sup> 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 séries 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.

<b>Maturité</b>	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)
<b>Perspective</b>	Amélioration de la résolution spatiale des capteurs optiques
<b>Automatisation</b>	Déjà fortement automatisé
<b>Données associées</b>	Cartographie de terrain
<b>Domaine d'observation</b>	Mondial
<b>Résolution spatiale</b>	Actuelle : Quelques mètres à 0,7 m Future : 0,3 – 0,5m
<b>Résolution temporelle</b>	Le temps de revisite, de l'ordre quelques jours, n'est pas un facteur limitant pour cette application.
<b>Précision</b>	Actuelle : Précision de quelques mètres à 0,7 m (centimétrique avec les LIDAR aéroportés) Futures : 0,3 – 0,5m
<b>Format des données</b>	Image satellites, base de données numériques géo référencées
<b>Accès données</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Images d'archives,</li> <li>▪ Possibilité de programmation d'images selon le type d'images</li> <li>▪ Accès libre et gratuit pour quelques produits (ex données Landsat) via les agences spatiales pour les données</li> <li>▪ Accès payant pour la plupart de ces données via les sociétés commerciales de distribution de données</li> </ul>
<b>Pérennité des données</b>	Bonne car de nombreuses missions optiques sont prévues dans les années à venir. Instruments en vol pour au-delà de 2022
<b>Délais de mise à disposition</b>	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)
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	Couverture végétale importante gênant la photo interprétation des images, couverture nuageuse quasi permanente de certaines zones, Topographie du milieu obligatoire.

## 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 retenues 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
<b>Type de technologie</b>	<b>Radar imageur SAR</b> Prise d'images programmée, différents angles d'incidence et niveaux de zoom possibles
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	Radar SAR sur satellites : Passé : ALOS, ENVISAT, ERS, RadarSAT 1... Actuel : constellation Cosmo-Skymed (CSK), RadarSat2, TerraSAR-X (TSX)... Futur : RCM, Sentinel 1A/B)...
<b>Mode de production</b>	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 des 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.
<b>Maturité</b>	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 délimitation est ensuite appliquée aux régions segmentées. Celle-ci nécessite une réduction du speckle (par moyennage) qui introduit une imprécision de localisation des contours.
<b>Perspective</b>	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.
<b>Automatisation</b>	Automatisation facile pour la segmentation mais plus délicate pour la classification.

<b>Données associées</b>	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.
<b>Domaine d'observation</b>	Mondial, sous les fauchées des satellites, sauf montagnes abruptes (layover).
<b>Résolution spatiale</b>	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 <sup>6</sup> . Future : 5m x 5m (pleine résolution Sentinel1), avec un code de segmentation optimal.
<b>Résolution temporelle</b>	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
<b>Format des données</b>	Cartes de contour et surface des étendues d'eau
<b>Accès données</b>	Accès contraint (car on doit acheter les données, convention GEOS) Libre dans le futur avec Sentinel
<b>Pérennité données</b>	une dizaine de satellites programmés ou considérés, instruments en vol jusqu'en 2025.
<b>Délais de mise à disposition</b>	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
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	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 <u>à condition que le plan d'acquisition introduise bien le mode StripMap au dessus des zones d'intérêt pour l'hydrologie.</u>

<sup>6</sup> 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.

## 12.6. OCCUPATION DU SOL DES BASSINS VERSANTS PAR IMAGEUR OPTIQUE

<b>Paramètre</b>	<b>Cartographie des bassins versants</b>
<b>Type de technologie</b>	<b>Imageur optique haute-résolution</b> Prise d'images programmée et niveaux de zoom possibles
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	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)
<b>Mode de production</b>	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,
<b>Maturité</b>	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"
<b>Perspective</b>	Amélioration de la résolution spatiale des capteurs optiques et des techniques de classification.
<b>Automatisation</b>	Pour les classifications simples de nombreux outils existent. La classification ne peut cependant pas être considérée comme un processus automatique il requiert expertise et corrélation avec une vérité terrain pour étalonnage et réglages algorithmiques adaptés à la situation particulière analysée.
<b>Données associées</b>	Données topographiques, vérité terrain pour étalonnage et réglages algorithmiques
<b>Résolution spatiale</b>	De 30 mètres à 0.5 mètre
<b>Résolution temporelle</b>	En fonction du type d'étude
<b>Précision</b>	Variable selon le type de capteur et le type de produit : de 2 m à quelques mètres
<b>Format des données</b>	Images satellites optiques géoréférencées
<b>Accès données</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Images d'archives,</li> <li>▪ Possibilité de programmation d'images selon le type d'images</li> <li>▪ Accès libre et gratuit pour quelques produits (ex données Landsat) via les agences spatiales pour les données</li> </ul> <p>Accès payant pour la plupart de ces données via les sociétés commerciales de distribution de données</p>
<b>Délais de mise à disposition</b>	J+3 pour des images d'archive, non déterminé pour les images programmées
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	Couverture nuageuse quasi permanente de certaines zones, pollution atmosphérique sur les grands centres urbains



## 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

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

	1/200 de la taille du bassin versant).
<b>Format des données</b>	Base de données numériques géoréférencées
<b>Accès données</b>	Accès libre aux données sources via les agences spatiales, produit MNT finis, payant via les prestataires de service.
<b>Pérennité des données</b>	Bonne
<b>Délais de mise à disposition</b>	J+1 à J+5 selon les zones et étendues des zones d'étude
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	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

<b>Paramètre</b>	Bathymétrie
<b>Type de technologie</b>	<b>Imageur optique haute-résolution</b> Prise d'images programmée et niveaux de zoom possibles
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	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...
<b>Mode de production</b>	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.  <i>Opérationnel de +3m à environ -6m, suivant la clarté de l'eau.</i>
<b>Maturité</b>	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
<b>Perspective</b>	Assez bonne car la technologie en mode recherche est prometteuse.
<b>Automatisation</b>	Automatique (avec ou sans calibration)
<b>Données associées</b>	Données de calibration in-situ pour améliorer la précision
<b>Domaine d'observation</b>	Mondial
<b>Résolution spatiale</b>	Actuelle : 10m (Spot-5, archives), 6,5m (RapidEye), 5m (SPOT-5), 6,5m (RapidEye), 0,7m (Pléiades), 2 m annoncé par Digital Globe
<b>Résolution temporelle</b>	Quelques jours (suffisant pour ces études)
<b>Précision</b>	0,30 à 0,40m avec calibration in-situ, 0,8m sans calibration in-situ

<b>Format des données</b>	Cartes bathymétriques (raster), positions des bancs de sable
<b>Accès données</b>	Restreint, achat d'images
<b>Pérennité des données</b>	Instruments en vol pour au-delà de 2022
<b>Délais de mise à disposition</b>	J + 1 à 2 jours de traitement
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ 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.</li><li>▪ Même contrainte en fleuve ou en rivière. Intérêt cependant pour les déplacements de bancs de sable affleurant.</li></ul>

## 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 INFRASTRUCTURES PAR RADAR IMAGEUR SAR

Paramètre	Déplacement des sols et infrastructures
<b>Type de technologie</b>	<b>Radar imageur SAR - Interférométrie InSAR</b> Prise d'images programmée, différents angles d'incidence et niveaux de zoom possibles
<b>Instrument(s) embarqué(s)</b>	SAR interféromètre
<b>Mode de production</b>	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.
<b>Maturité</b>	La technologie est utilisée depuis 15 ans. La qualité des résultats a été démontrée avec un grand nombre de projets industriels.
<b>Utilisation actuelle</b>	Pour le suivi des mouvements de terrain en zones sensibles (zones urbaines, oil & gas, mines...).
<b>Perspective</b>	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
<b>Automatisation</b>	La plupart des process sont automatiques mais l'intervention d'un analyste expert des images est recommandée
<b>Application à l'international</b>	De grandes zones peuvent être suivies sans données in situ
<b>Données associées</b>	MNT précis et des photos ortho-rectifiées (mais non nécessaires).
<b>Domaine d'observation</b>	Mondial, sous les traces des satellites (pinceau de 30-100 km au range).
<b>Résolution spatiale</b>	Actuelle : 1 à 3m, Future : <1m
<b>Résolution temporelle</b>	Par l'utilisation d'une constellation de satellites, 1 acquisition tous les 4 jours dans le meilleur des cas
<b>Précision</b>	1-2 mm/an (vitesse de déformation des sols)

<b>Format des données</b>	Images SAR + rapports d'interprétation
<b>Accès données</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Accès restreint, services commerciaux ( données payantes).</li><li>▪ Historique des données : depuis 1992 (ERS)</li><li>▪ Sources : agences spatiales, Infoterra, e-Geos...</li></ul>
<b>Pérennité des données</b>	Bonne, une dizaine de satellites programmés ou considérés, des instruments en vol jusqu'en 2025.
<b>Délais de mise à disposition</b>	Actuelle : J + 4 semaines, Future : J + 2 semaines
<b>Contraintes à l'utilisation</b>	La densité des points de mesures dépend de la décorrélation temporelle, des caractéristiques du terrain et de la période temporelle de l'étude.