

# Altimétrie pour l'hydrologie

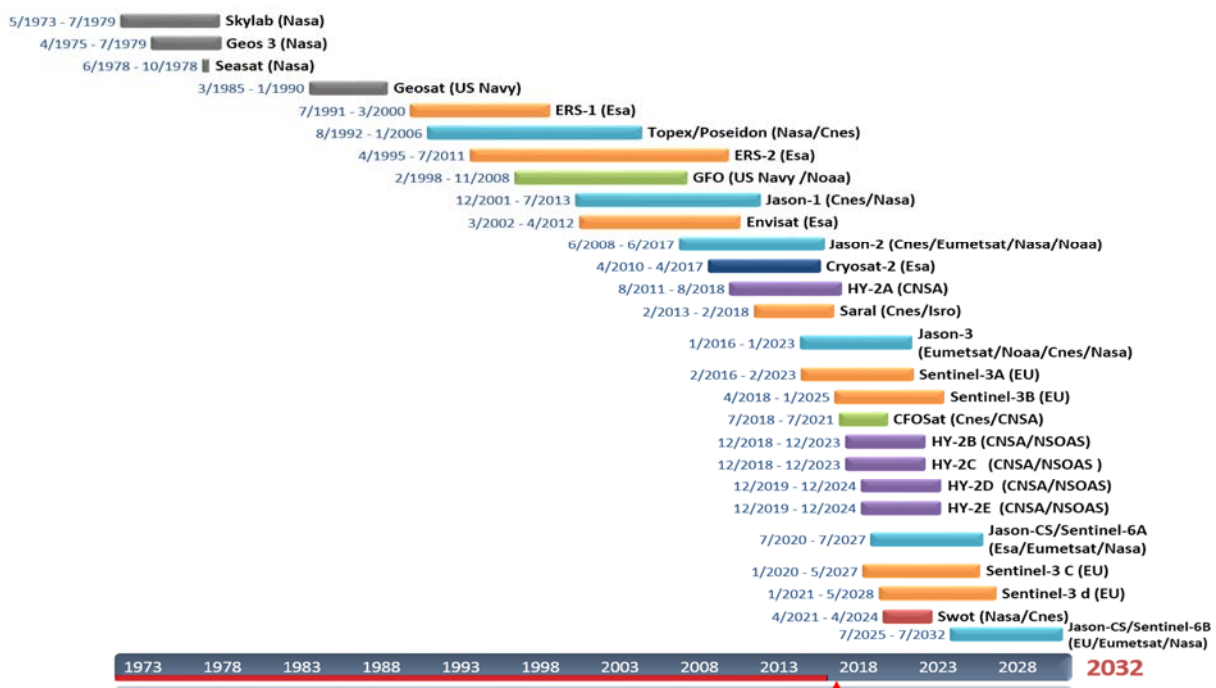


L'altimétrie radar satellitaire a été conçue et développée dans les années 1970 pour l'étude de la variabilité spatio-temporelle du niveau des océans. Aujourd'hui, les radars altimètres mesurent la hauteur instantanée de la surface sous la position verticale du satellite (nadir), avec une précision de l'ordre de quelques centimètres sur océan. Contrairement aux systèmes passifs de mesure qui utilisent le rayonnement émis par le soleil ou la Terre, les radars sont des systèmes actifs qui utilisent leur propre source de rayonnement, ce qui offre de multiples avantages : précision des mesures, pouvoir de pénétration, de jour comme de nuit... De plus, les longueurs d'ondes utilisées permettent une utilisation quelles que soient les conditions météorologiques (mesures possibles au travers des nuages moyennant de corriger certains de leurs effets).

Mais l'altimétrie radar permet aussi de mesurer l'altitude des grands plans d'eau continentaux et des fleuves, ce qui peut compléter des réseaux de mesures hydrométriques existants, voire se substituer à certaines stations hydrométriques jugées peu fiables ou peu efficaces (délai de délivrance de l'information trop important, par exemple). L'altimétrie spatiale assure, sans intervention humaine sur le terrain en dehors des activités de calibration, des mesures du niveau de cours d'eau et de lacs, selon un référentiel unique, avec une couverture globale et une pérennité temporelle garantie.

## L'altimétrie aujourd'hui : mesurer la hauteur de la surface

Les mesures spatiales d'altimétrie radar sont effectuées en continu depuis le début des années 1990, avec deux séries de satellites qui se sont relayés depuis lors (la série ERS-1, ERS-2, Envisat, Saral, et la série Topex/Poséidon, Jason-1, 2, 3). Quelques autres satellites ont été lancés durant cette période (GFO, HY-2A et surtout Cryosat-2). Certains satellites ont même été lancés avant cette date (Seasat, Geosat), mais ne sont pas utilisés en hydrologie. Sentinel-3 constitue une nouvelle série utilisant une nouvelle orbite, commencée en février 2016 et appelée à être pérennisée.



### Historique des missions altimétriques

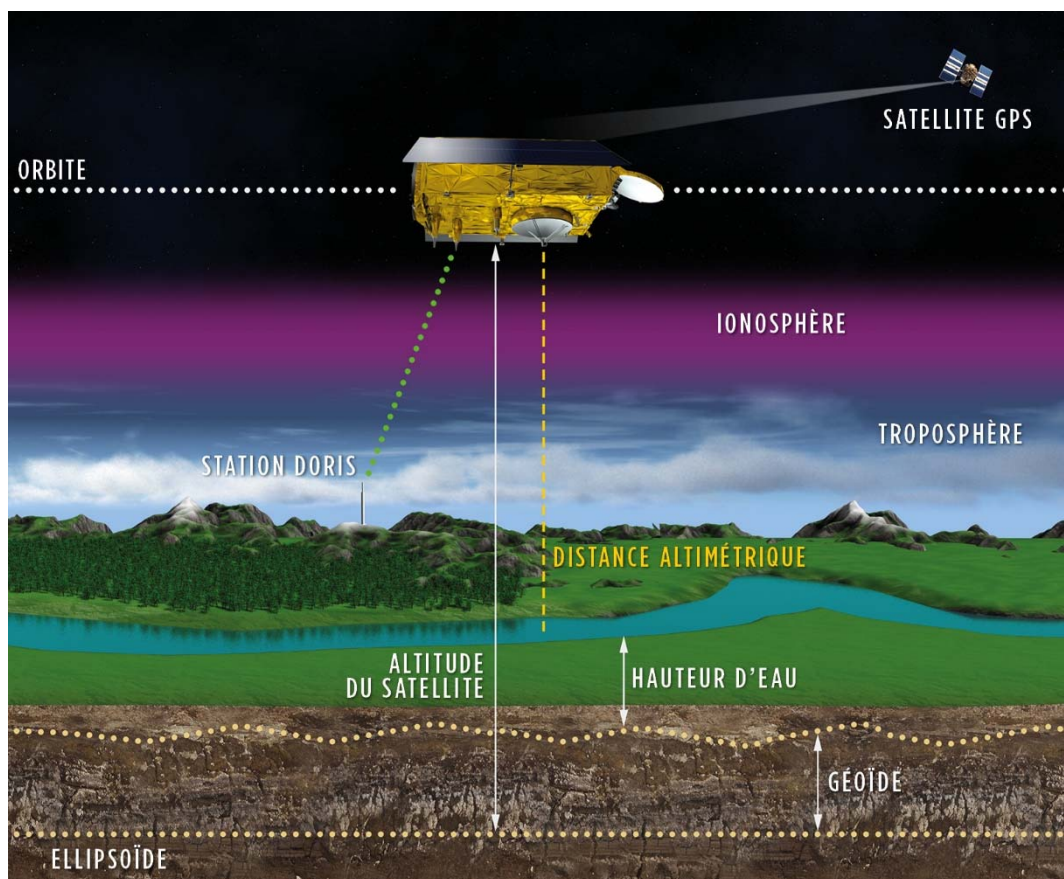
À l'heure actuelle, toutes les missions altimétriques effectuent des mesures uniquement au nadir (à la verticale sous le satellite), et fournissent donc des observations très peu étendues spatialement. C'est la principale limitation de ces missions.

Deux techniques sont à ce jour utilisées : l'altimétrie « conventionnelle » sur les missions Topex/Poséidon, les Jason, Saral ou Envisat, appelée « LRM » (pour *Low Resolution Mode*), et l'altimétrie « SAR » (*Synthetic Aperture Radar*, Radar à Synthèse d'Ouverture) aussi appelée « *Delay-Doppler Altimetry* » qui est utilisée sur Cryosat-2 et les Sentinel-3.

L'altimétrie à large fauchée qui constitue une technique nouvelle, sera embarquée sur le satellite Swot pour un lancement prévu en 2021 et permettra une observation en deux dimensions des cours et plans d'eau.

D'une façon simplifiée, pour ces deux techniques, on utilise une onde radar émise par le satellite droit vers la terre, qui se réfléchit sur la surface (l'eau constituant le meilleur « miroir », du moins quand elle est calme). On mesure le temps mis par l'onde à faire l'aller-retour entre le satellite et la surface ; connaissant la vitesse de propagation de cette onde (la vitesse de la lumière) on en déduit la distance entre le satellite et la surface. Le principe est voisin de celui de la réflexion des ondes sonores. Lorsque vous criez dans la direction d'un objet qui peut réfléchir le son de votre voix, un canyon ou une grotte par exemple, vous entendez l'écho de votre voix. Si vous connaissez la vitesse du son dans l'air, vous pouvez alors estimer la distance en considérant le temps nécessaire à l'aller et au retour du son (on parle d'ailleurs « d'écho » radar, par analogie).

De plus, grâce à plusieurs instruments embarqués (Doris, GPS, réflecteur laser), on connaît très précisément l'altitude et la position du satellite. En faisant la soustraction, on en déduit une hauteur de la surface par rapport à une référence, et surtout, d'un passage du satellite au suivant au-dessus d'un même point, on observe les variations de cette hauteur. La référence utilisée dans les données de base est un ellipsoïde de référence, soit une forme géométrique de type sphère aplatie aux pôles, proche de celle de la Terre. En hydrologie, cependant, on utilise plus fréquemment le géoïde, surface d'égale gravité (équipotentielle du champ de gravité), plus proche de la forme réelle de la Terre car elle est déformée par les reliefs. Cette surface est généralement fournie dans les données altimétriques, mais d'autres données la fournissent avec une meilleure précision. L'utilisation d'une telle référence permet l'obtention de l'altitude de la surface en eau, et donc de la pente, variable primordiale pour l'hydrologie.



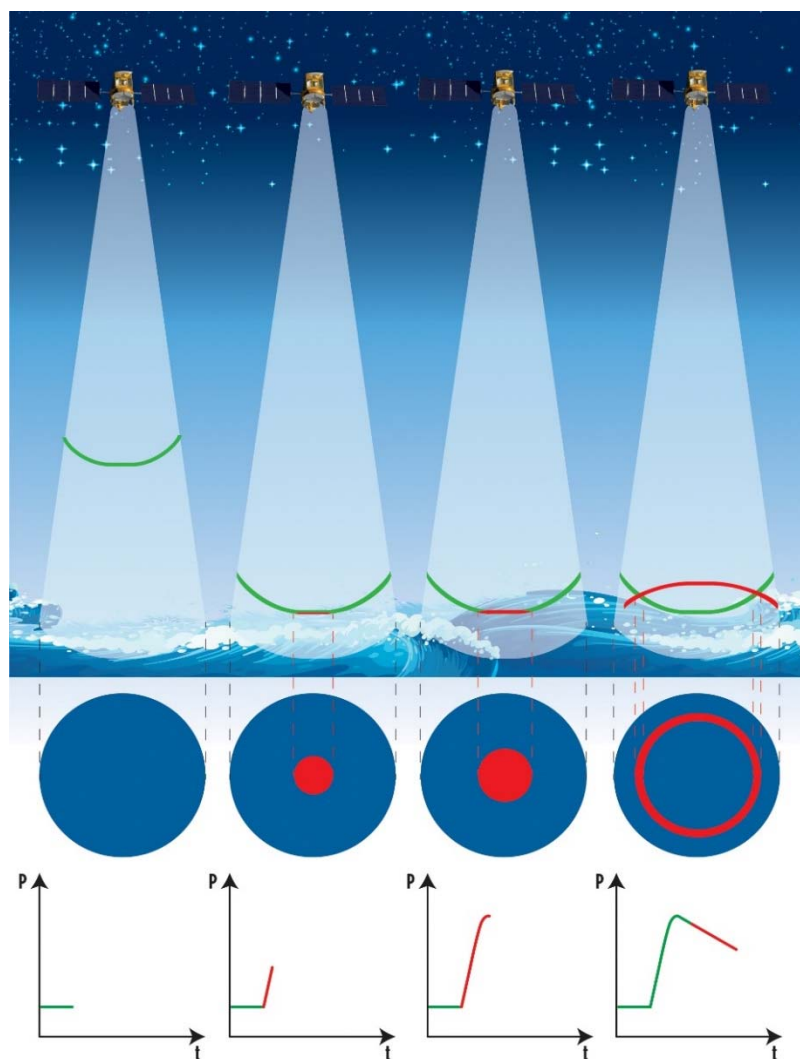
Principe de l'altimétrie

Ceci n'est cependant qu'un schéma simplificateur. D'une part car il faut prendre en compte un certain nombre de facteurs qui influent sur la vitesse de l'onde, et la corriger en conséquence, ce qui est réalisé via des modèles (météorologiques notamment), et éventuellement via des mesures auxiliaires effectuées par des instruments à bord du satellite (ou non) mais surtout sur océans. Mais aussi parce que l'on ne chronomètre pas à proprement parler ce temps aller-retour. En effet, la surface réfléchissante est rarement parfaitement plane, et l'onde a une étendue (« tâche au sol »), et une durée. Tout ceci fait que l'écho en retour n'arrive pas instantanément à un instant donné, mais s'étale dans le temps avec une amplitude qui varie. On travaille alors sur la forme de l'écho radar en fonction du temps, appelée « forme d'onde » en altimétrie.

### Les échos radar en altimétrie conventionnelle

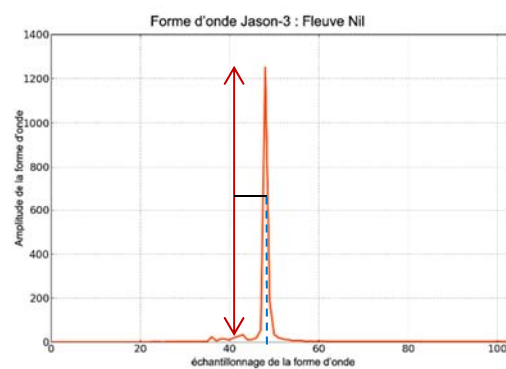
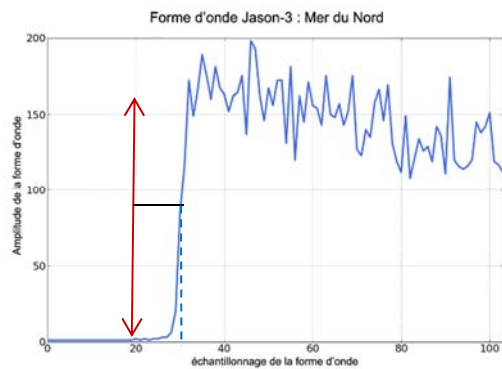
Les satellites concernés sont : ERS-1 & 2, Topex/Poséidon, GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2, Saral, HY-2, Jason-3 (ainsi que les précurseurs).

L'altimétrie « conventionnelle » prend en compte la réflexion du faisceau émis dans sa globalité - du moins ce qui retourne à l'antenne du satellite.



**Écho d'altimétrie conventionnelle sur océan. En haut, la schématisation du satellite et de l'onde émise, avec en rouge l'onde réfléchie. Au milieu, ce qui se passe sur la surface (ici d'un océan avec une surface plane). En bas, l'écho (ou forme d'onde) reçue par l'altimètre, la partie rouge de la courbe correspondant à l'étape schématisée au-dessus.**

**La partie qui monte brusquement de cet écho est ce qui est utilisé pour déterminer la distance (le point à mi-hauteur). La superficie des anneaux rouges est la même que celle du cercle ; la pente descendante de la courbe est liée au gain de l'antenne de l'altimètre.**



**Écho classique sur océan (à gauche), et sur fleuve (à droite). Seul le premier fait l'objet d'une représentation complète sous forme d'une équation [Brown, 1977]. Le second permet cependant d'extraire l'information de temps en utilisant (dans les deux cas) le temps du point à mi-hauteur de la montée brusque observée.**

Compte tenu de la diversité des échos rencontrés sur les surfaces hydrologiques, pic singulier ou série de pics multiples plus ou moins imbriqués, des exercices de classification ont été entrepris dans le cadre de projets. La figure ci-dessous illustre les classes retenues dans le cadre de la classification des données de Jason-2. Certaines classes correspondent à des échos sur océan ou surfaces d'eau assez vastes (plus de 10 k : classe 1, échos de Brown). Les échos sur rivières et fleuves sont plus dans la classe 2, ou dans des classes plus bruitées (mais de ce fait plus difficilement exploitables comme la classe 23, voire pas du tout exploitables comme la classe 3). Des lacs gelés peuvent donner des échos du type classe 13.

<p><b>Classe 1</b></p> <p>Échos de Brown</p>	<p><b>Classe 2</b></p> <p>Échos en pic</p>	<p><b>Classe 3</b></p> <p>Échos très bruités</p>	<p><b>Classe 4</b></p> <p>Échos linéaires</p>	<p><b>Classe 5</b></p> <p>Pic à la fin de l'écho</p>	<p><b>Classe 6</b></p> <p>Échos en pic très large</p>
<p><b>Classe 12</b></p> <p>Échos Brown + pic</p>	<p><b>Classe 23</b></p> <p>Pic + bruit</p>	<p><b>Classe 13</b></p> <p>Brown + perturbation du front de montée</p>	<p><b>Classe 24</b></p> <p>Brown + pic + variation linéaire</p>	<p><b>Classe 15</b></p> <p>Brown + front de montée croissant</p>	<p><b>Classe 0</b></p> <p>CS32</p>
<p><b>Classe 21</b></p> <p>Échos Brown + pic</p>	<p><b>Classe 35</b></p> <p>Front de montée à la fin + bruit</p>	<p><b>Classe 16</b></p> <p>Brown + plateau décroissant fortement</p>	<p><b>Classe 99</b></p> <p>??</p> <p>doute</p>		

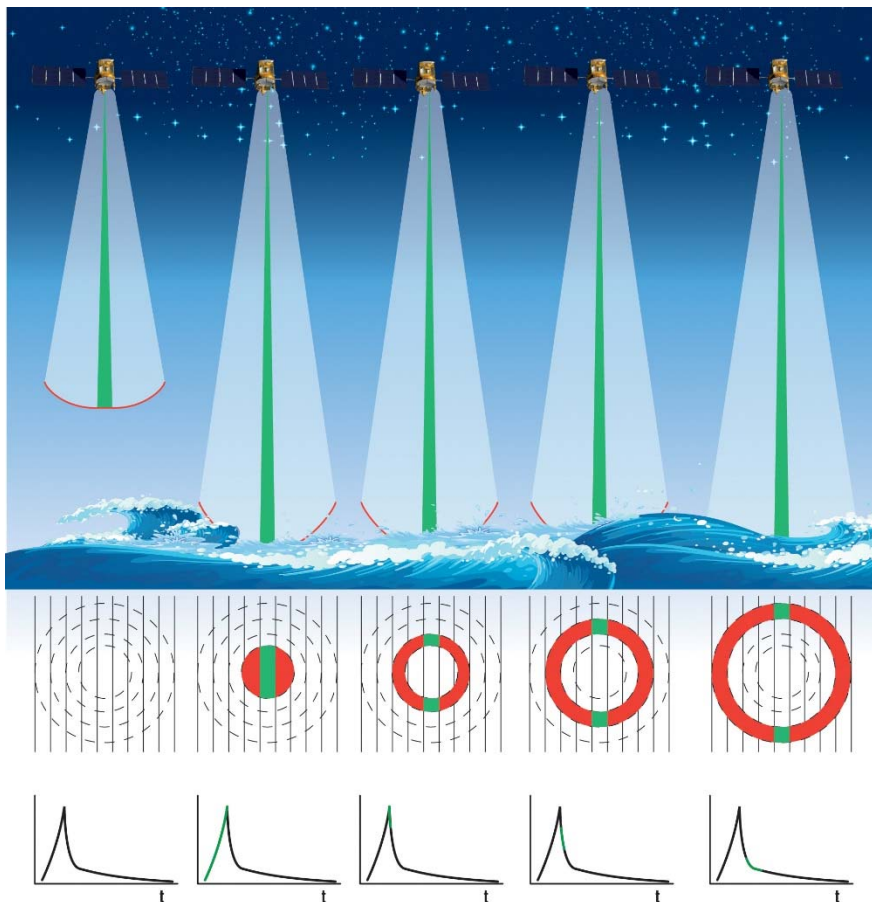
**Différentes formes d'écho (Classes de formes d'onde, altimétrie conventionnelle) ; la classe 2 est ce que l'on peut rencontrer typiquement sur un cours d'eau simple, la classe 1 (« Brown ») étant la forme classique sur océan.**

## Les échos radar en altimétrie à retard Doppler

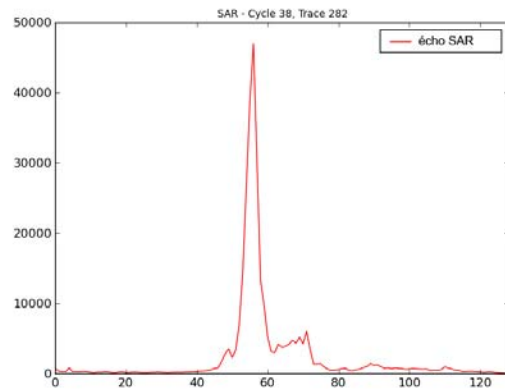
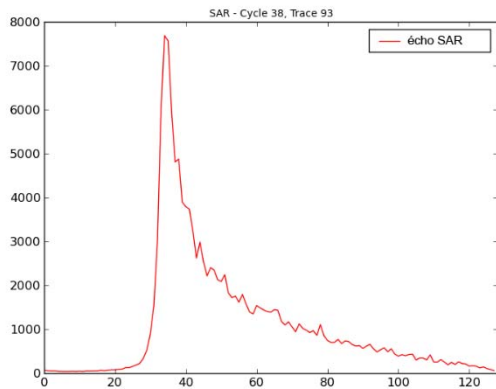
Les satellites concernés sont : Cryosat-2, Sentinel-3 (A & B), dans le futur Sentinel-3 (C & D), Jason-CS/Sentinel-6.

Le son émis par un objet en mouvement semble plus ou moins aigu selon la vitesse à laquelle il se rapproche, et plus ou moins grave selon la vitesse à laquelle il s'éloigne. C'est ce que l'on appelle l'effet Doppler (ou Doppler-Fizeau quand on parle de rayonnement électromagnétique).

L'altimétrie « SAR » utilise cet effet Doppler pour discriminer les réflexions venant de l'arrière ou de l'avant du faisceau émis : venant de l'arrière tout se passe comme si le satellite s'éloigne, venant de l'avant le satellite se rapproche. On obtient une sorte de découpage « en tranches » perpendiculaires à la trajectoire du satellite de la tâche au sol conventionnelle. Et donc une plus grande résolution spatiale, du moins dans la direction dans laquelle le satellite avance.



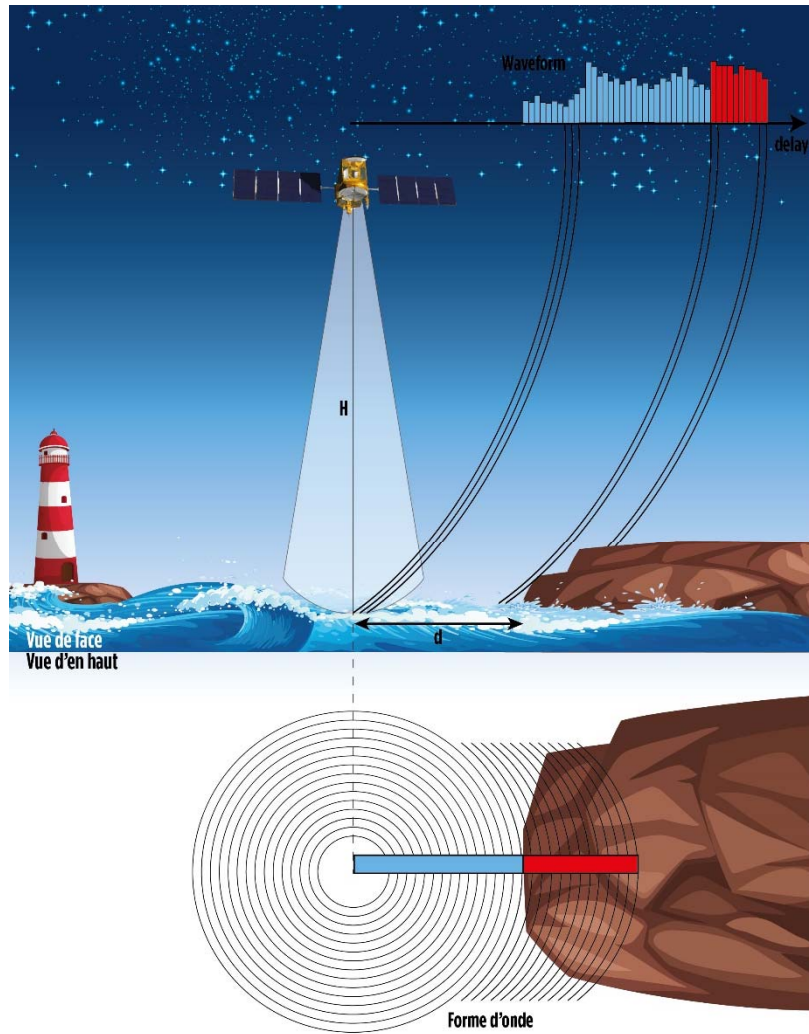
**Formation d'un écho par altimétrie Doppler (sur océan) ; là où l'altimétrie conventionnelle montrait un quasi plateau après la montée (car la surface de chacun des anneaux représenté est égale), l'écho en altimétrie Doppler décroît. (Credits Cnes/CLS, d'après une présentation de K. Rayney)**



**Écho altimétrie Doppler sur océan (à gauche) et sur fleuve (à droite).**

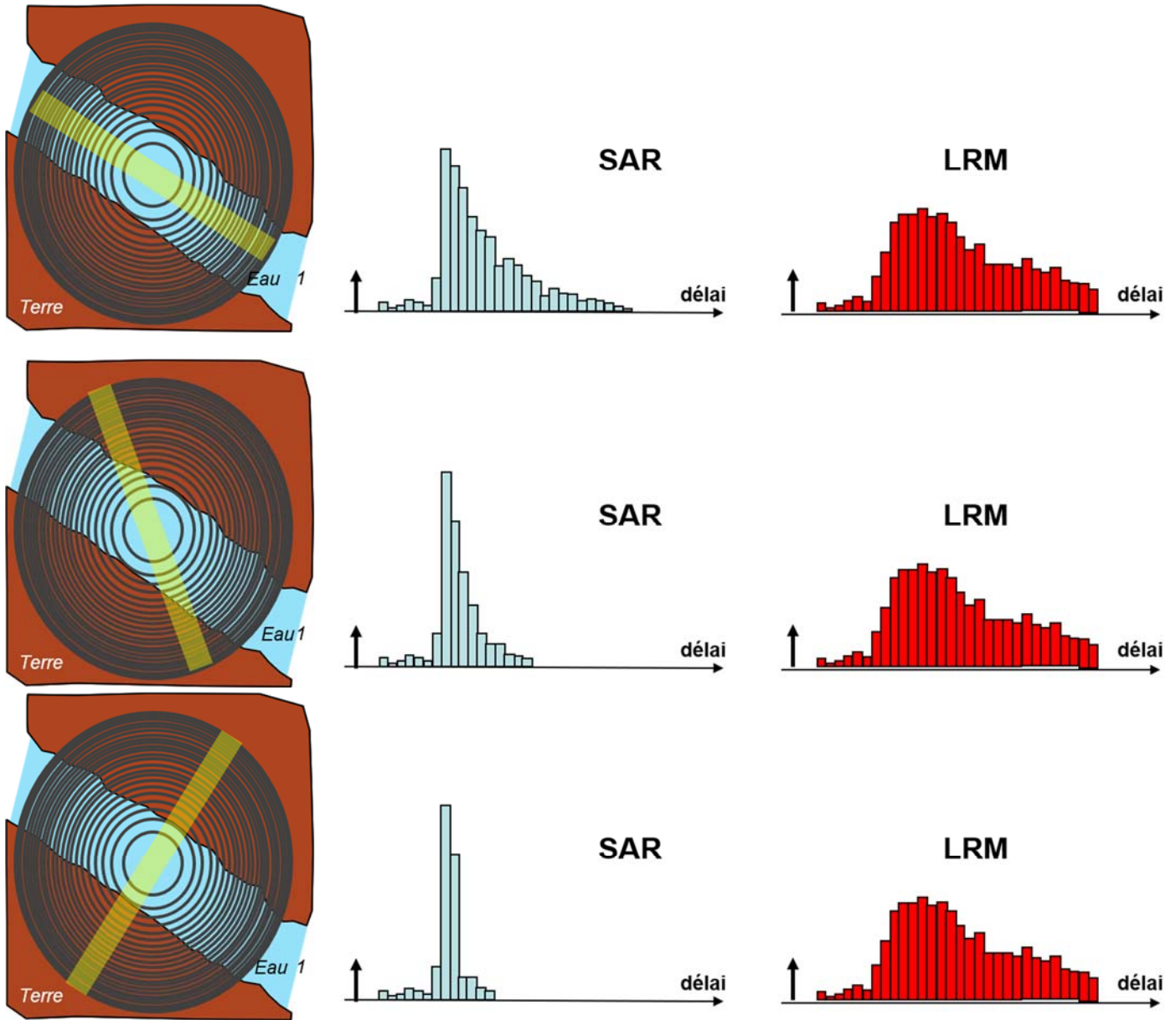
### Sur quoi l'onde radar de l'altimètre se réfléchit-elle ? (ou : qu'observe-t-on réellement ?)

L'« empreinte » (ou « tâche au sol »), c'est-à-dire la zone sur laquelle l'onde radar s'est réfléchi avant de revenir à l'altimètre dépend de l'altitude du satellite (723, 790 ou 1336 km), de la résolution de la porte d'une forme d'onde (relié à la bande passante de l'altimètre), de l'ouverture et du gain de l'antenne ainsi que de la durée de la mesure (ou le nombre de « portes »). On va ainsi de 4,8 à 9,5 km de rayon. Ceci conduit à des surfaces de près de 290 km<sup>2</sup> pour un Jason (à 1336 km d'altitude) et 100 km<sup>2</sup> pour Saral. Avec la technique Doppler à retard, qui permet de diviser cette surface en plusieurs « tranches », la zone observée est fortement réduite mais reste de près de 5 km<sup>2</sup>. Quand on s'intéresse aux fleuves, rivières et même aux petits lacs, il est quasiment certain qu'il n'y a pas que de l'eau dans une telle zone. Ceci dit, si l'on ne considère que le front de montée et les premières portes de l'écho, on limite un peu cette surface, mais de l'information est potentiellement perdue.



**La présence de terres dans la tâche au sol peut perturber l'écho ; cette perturbation sera d'autant plus forte que le sol sera réfléchissant**





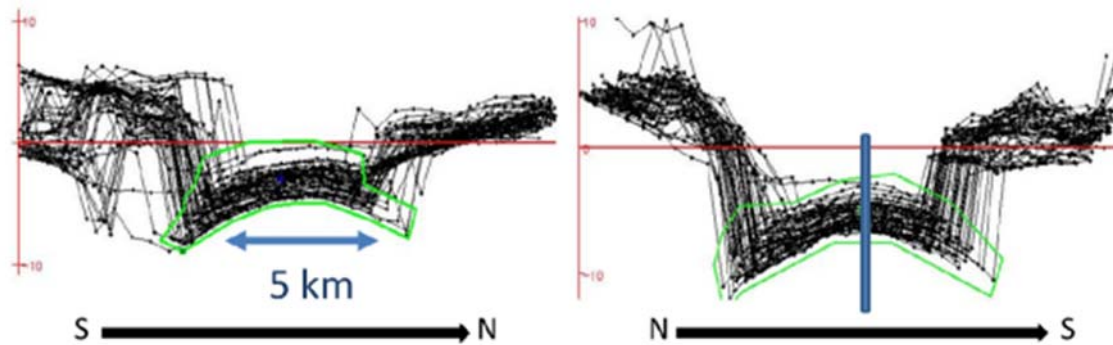
**Échos en modes SAR ou classique (LRM) selon les positions respectives de la trajectoire du satellite (perpendiculaire aux rectangles du mode SAR) et du cours d'eau.**

Les conditions d'acquisition des mesures altimétriques sur les grands lacs et les mers intérieures sont très similaires aux conditions océaniques. Si les surfaces d'eau sont assez importantes, et à condition de se placer suffisamment loin des berges et des reliefs qui les entourent nous obtenons principalement des échos dit « de Brown ».

Sur les cours d'eau, le signal est plus complexe du fait de l'hétérogénéité des surfaces observées. La réflexion se fait sur un mélange de surfaces de différentes natures et de différents pouvoirs réfléchissants, comme l'eau libre, les forêts, les plaines d'inondation, etc. Ceci a des conséquences notables sur la forme de l'écho (par exemple, des échos dont le flanc présente des pics multiples), et du coup sur la capacité d'en extraire les informations recherchées, en particulier la distance, d'où des mesures moins précises. Toutes les données altimétriques provenant de surfaces hétérogènes doivent être retraitées pour produire une mesure de l'élévation de la surface suffisamment précise. Ce retraitement est appelé "retracking" et utilise des algorithmes spécifiques (Ice1, Ice3, Sealce...). On peut le raffiner en utilisant différents algorithmes selon le type de forme d'onde, ce qui peut également permettre de limiter la zone prise en compte dans l'observation en ne prenant notamment que le début de l'écho (les premières « portes »).

Ces algorithmes de retracking sont basés sur des approches empiriques car il n'y a pas de modèle analytique en dehors du plein océan (modèle de Brown). Des recherches sont en cours pour améliorer ces algorithmes. Une approche en développement utilise un modèle numérique de terrain (MNT) et des cartes de rugosité (Legos). Une autre s'intéresse aux formes d'ondes avant et après celle qui est traitées (Legos/Ifremer), sur le principe qu'elles doivent être similaires.

De plus, on observe parfois des réflexions sur des surfaces peu pentues et fortement réfléchissantes (par exemple une plage de sable mouillé ...), telles que des rives par exemples, qui réfléchissent l'onde radar. On a alors un signal reçu par l'altimètre qui ne reflète pas le niveau de l'eau (ni même celui de la rive car il ne provient pas du nadir), mais une réflexion « parasite ».



**Exemple d'accrochage persistant sur le Rio Paro (Crédits S. Calmant, IRD)**

Les profils hydrologiques des lacs, fleuves, zones d'inondation, obtenus par altimétrie satellitaire sont censés être plats ou légèrement inclinés en raison de la pente du plan d'eau. Cependant des structures paraboliques tournées vers le haut sont observées sur de nombreux profils hydrologiques. Cet artefact, nommé accrochage (*hooking*), a lieu quand l'altimètre continue de mesurer une surface réfléchissante qu'il vient de survoler alors qu'il n'est plus situé au-dessus de celle-ci. Le temps de trajet aller-retour de l'onde est donc plus grand, ce qui conduit à une sous-estimation de la hauteur altimétrique (surestimation de la distance satellite-surface). La détection de ces paraboles offre la possibilité, après correction géométrique, d'augmenter la quantité d'observations du cours d'eau, et donc de réduire l'incertitude associée à la mesure. Cela est particulièrement intéressant pour les cours d'eau dont la faible largeur limite le nombre d'observations par le satellite (cf la figure ci-dessus, ou le fleuve étroit -barre bleue- est échantillonné sur plusieurs kilomètres grâce à cet accrochage).

On utilise une moyenne ou une médiane des mesures individuelles du plan d'eau afin d'éliminer des bruits aléatoires. Les données altimétriques sont généralement fournies à deux résolutions différentes, souvent dans le même fichier, l'une appelée « 1 Hz » fournit une mesure moyennée par seconde. L'autre, dont la fréquence dépend du satellite (10, 20 ou 40 Hz), n'est plus moyennée que sur  $1/10^e$ ,  $1/20^e$  ou  $1/40^e$  de seconde, fournissant ainsi des mesures plus rapprochées mais plus bruitées. Ceci correspond à une mesure tous les 700 m (Topex/Poséidon), 350 mètres (Envisat, Jason...) et 175 mètres (Saral) environ.

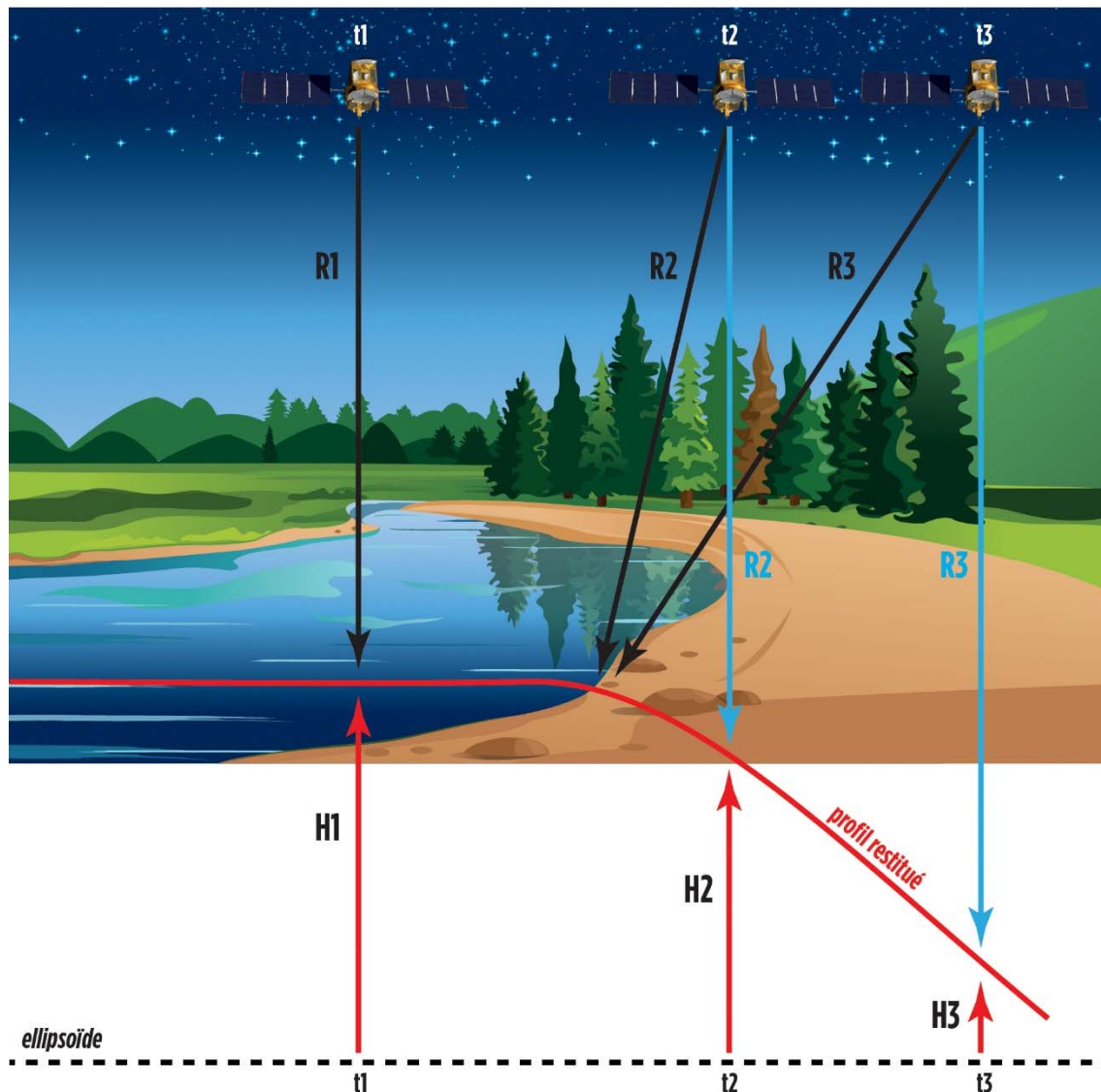
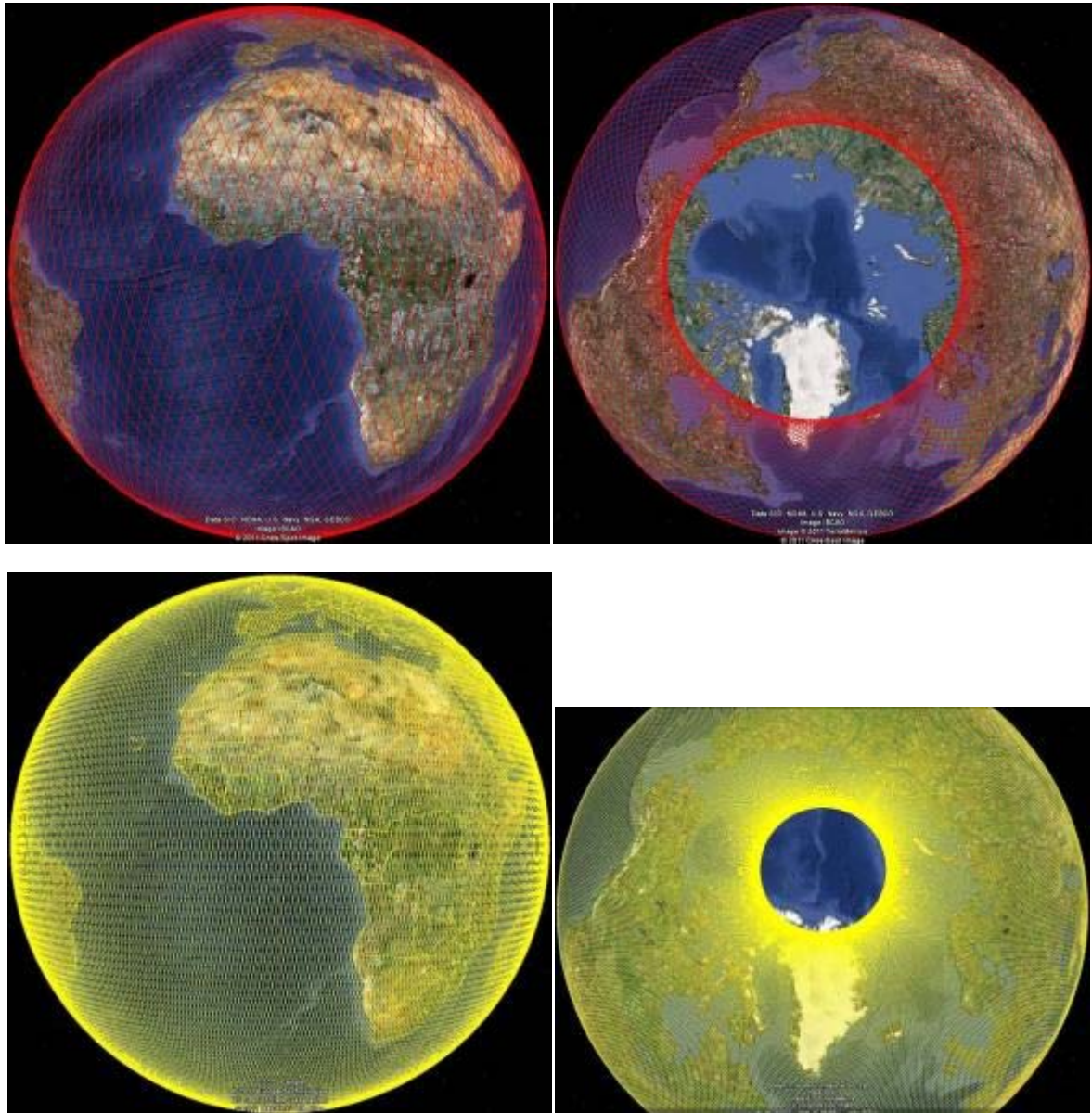


Schéma de principe des accrochages persistants ; le fait d'observer « de biais » rallonge la distance mesurée, d'où une élévation perçue de façon erronée de la surface.

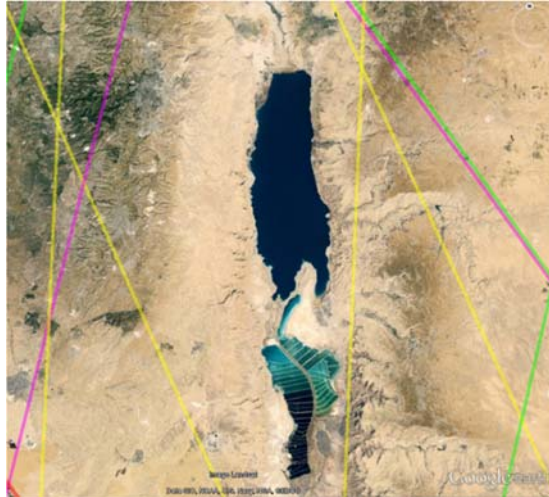
### La couverture spatio-temporelle des mesures

L'altimétrie actuelle n'est pas de l'imagerie : le satellite « sonde » ce qui se trouve directement sous lui. De plus, le choix de l'orbite d'un satellite altimétrique est un compromis entre échantillonnage spatial et échantillonnage temporel : si un satellite passe fréquemment au-dessus du même point (échantillonnage temporel élevé), il couvrira moins de territoire que s'il a une période plus longue (échantillonnage temporel plus restreint).



**Traces au sol Jason (haut) et Saral (bas). Le maillage est nettement moins serré pour les Jason, et les mesures plus loin des pôles, mais le temps de revisite est de 10 j, ce qui permet d'observer des variations de fréquences plus élevées.**

On obtient ainsi un maillage plus ou moins serré, mais qui ne couvre jamais l'intégralité de la surface. Certains grands plans d'eau peuvent ne pas être observés du tout par un satellite donné, comme par exemple la Mer Morte ou le lac d'Hourtin (Gironde, France).



**Traces Jason-1, Envisat et GFO autour de la mer Morte.**

Pour résoudre ce problème, une des solutions est d'associer plusieurs satellites. De ce point de vue, les démarches mises en œuvre depuis plus de vingt années d'association de satellites avec de mêmes orbites répétitives à 10 jours, à 35 jours et au-delà, permet d'envisager des traitements à des fins hydrologiques sur les archives constituées au fil de trois générations de couples de satellites (Topex/Poséidon/ERS-1&2, Jason-1/Envisat, Jason-2/Saral). Désormais Jason-3 et Sentinel-3A et bientôt Sentinel-3B devraient assurer une couverture spatio-temporelle unique, qui sera prolongée dans la prochaine décennie (Jason-CS, Sentinel-3C & D).



**Traces des satellites Sentinel-3A & 3B toujours sur la mer Morte.**

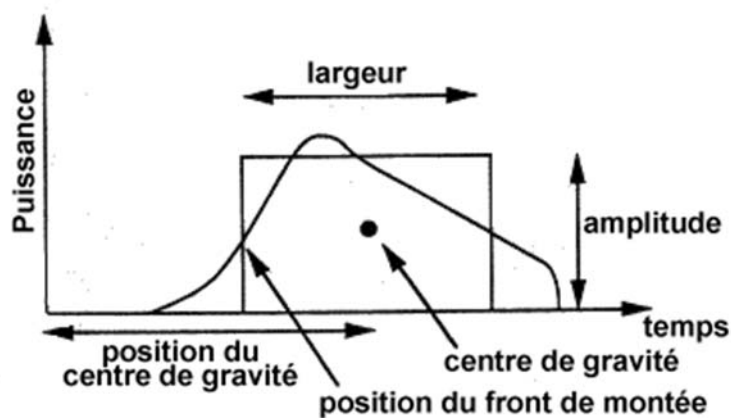
Une autre approche, pour les fleuves et rivières, est de modéliser ce qui se passe en aval des mesures prises par le satellite. On utilise la mesure spatiale comme si une station hydrographique était installée à l'endroit où la trace au sol croise le cours d'eau, couplée à des données météorologiques, pour modéliser ce qui se passe en aval. L'apport des observations altimétriques et notamment conséquent dans le cas des bassins transfrontaliers, en permettant aux pays situés en aval d'avoir des informations sur l'état des variables hydrologiques sur les parties amont des bassins.

Le faible échantillonnage temporel rend cependant l'utilisation directe des mesures altimétriques peu adaptée pour des alertes rapides en cas de crues. Mais elles peuvent être utilisées pour une alerte précoce en aval (<http://floodlist.com/asia/bangladesh-expand-servir-satellite-flood-warning-system>), et également *a posteriori* pour comprendre et modéliser de tels événements.

## De l'écho à la hauteur de la surface hydrographique

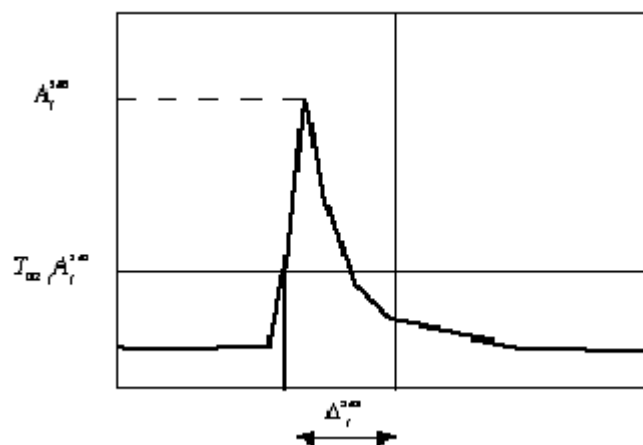
Comme mentionné précédemment, la distance satellite-surface est déduite de l'écho radar. Sur un écho typique « océan » (ou grand lac), on se base sur l'abscisse du point à mi-hauteur de la partie en forte pente (le front de montée) pour cette estimation (on considère la distance en prenant à mi-hauteur des vagues). Dans des cas plus complexes, avec notamment plusieurs « pic » comme on le retrouve fréquemment sur eau continentales, les choses sont plus complexes, et on utilise d'autres algorithmes appelés « retracking » pour estimer cette distance.

- Algorithmes basés sur une méthode de seuillage :
  - Ice1 (Wingham et al., 1986) : initialement créé pour l'étude des calottes polaires. Le principe est de définir un rectangle dont le centre de gravité concorde avec celui de la forme d'onde. On prend alors l'abscisse du premier point dont la puissance atteint un pourcentage donné de l'amplitude de ce centre de gravité (30% dans ce cas)



Principe de l'algorithme Ice1 (d'après Wingham et al 1986)

- Ice3 fonctionne sur le même principe que Ice1, mais avec une analyse sur une partie restreinte de la forme d'onde (on laisse de côté la fin de l'écho).
- Sea-Ice (Laxon, 1994) : algorithme utilisée pour l'étude des glaces de mer

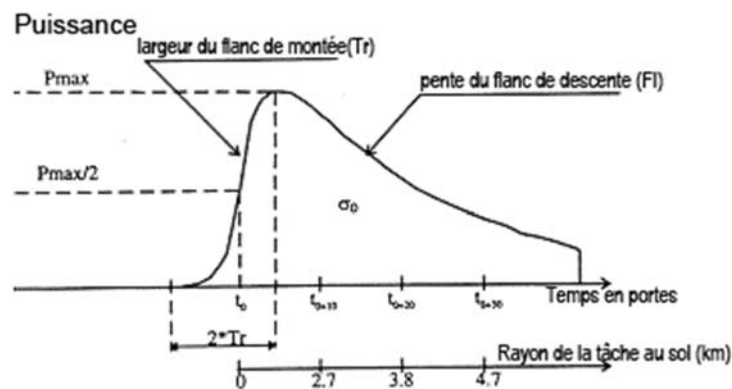


Principe de l'algorithme Sea Ice (Laxon, 1994)

Ces trois retracking sont empiriques (et non basés sur des lois physiques mathématisées) ; ils ne prennent pas en compte les caractéristiques de chaque instrument, et ne fournissent que la distance satellite-surface et le coefficient de rétrodiffusion, pas les autres paramètres que l'on peut extraire des échos. Ice1 est celui qui est le plus fréquemment utilisé dans des applications hydrologiques. Ice3 améliore ces résultats, mais n'est fourni aux utilisateurs que pour Jason-2.

□ Algorithme basé sur l'ajustement des formes d'onde réelles à des modèles théoriques de forme d'onde

- Ocean [Brown, 1977] : algorithme de base utilisé dès les premières missions altimétriques. On utilise un algorithme d'estimation du maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Estimation, MLE) qui se base sur trois, voire quatre, paramètres (« MLE3 » ou « MLE4 »).
- Ice2 [Legrésy et Rémy, 1997] : créé pour l'étude des calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland



Forme d'onde théorique recherchée par Ice2

- Red3 analyse une partie seulement de l'écho (-10 ; +20 échantillons par rapport au front de montée) avec un estimateur du maximum de vraisemblance (résolu avec trois paramètres : range, amplitude et Sigma composite).
- Océ3 fonctionne sur le principe du maximum de vraisemblance avec trois paramètres (MLE3), mais sur un écho préalablement filtré pour réduire le bruit.

À l'exception de Ice2, ces méthodes sont surtout adaptées à l'océan, et éventuellement aux grands lacs ou plans d'eau

- Méthode de reconnaissance de formes : les formes d'onde sont triées en fonction de leur aspect ; un algorithme de retraitement adapté à chaque type identifié est ensuite appliqué
- Le Retracker adaptatif combine plusieurs améliorations testées lors de différents projets. Il utilise un paramètre de rugosité de la surface qui permet de prendre en compte différents types de surface. Il adapte son analyse à la longueur utile de l'écho, selon leur classe. Il tient aussi compte de la réponse impulsionnelle réelle de l'instrument, et non d'une impulsion théorique. On arrive ainsi à s'approcher au plus près de la forme d'onde, et ce quelles que soient les surfaces sur lesquelles l'onde s'est réfléchi, sans faire appel à des algorithmes différents, et ce en fournissant en sortie tous les paramètres que l'on peut extraire des échos (distance satellite-surface, mais aussi pente du front de montée et amplitude, pente du flanc).

## De la hauteur de la surface aux variables hydrographiques

L'altimètre ne suit généralement pas les fleuves et rivières sur tout leur cours, mais les croise par endroits ; on définit donc la notion de « station virtuelle » : tout se passe comme si on avait une station de mesure là où en

moyenne le satellite croise le cours d'eau. Cette mesure peut alors être utilisée comme une mesure « *in situ* », sauf que l'on ne connaît pas forcément précisément la profondeur du cours d'eau à cet endroit ; on travaille donc plus sur des variations de hauteur que sur la profondeur (hauteur absolue par rapport au fond du lit du cours d'eau). Par rapport aux bases de données *in situ* classiques, l'altimétrie satellitaire fournit des observations à une résolution spatiale plus importante (même si les points d'observation possibles sont prédéterminés par l'orbite choisie, il y en a plus que de stations *in situ*) mais à une résolution temporelle moindre. Cependant, bien souvent les bases de données *in situ* ne sont mises à jour que périodiquement, et les seules informations disponibles en temps quasi réel sont donc les observations par satellite.

Les mesures de hauteur peuvent être combinées à des images optiques ou des images radar obtenues par d'autres satellites (Spot, Pléiades... et Sentinel-3, Sentinel-2, Sentinel-1, CosmoSkyMed, TerraSAR...) pour déterminer l'étendue d'un plan d'eau. On calcule ainsi les variations du volume d'eau.

De plus, le débit d'un cours d'eau peut être calculé à partir de la hauteur, combinée à d'autres informations. Des modèles plus ou moins complexes, intégrant plus ou moins d'informations auxiliaires (bathymétrie, ...) sont développés (courbes de tarage hauteur/débit, modèles hydrauliques, méthodes d'assimilation, etc.). Les méthodes sont généralement basées sur l'existence d'une relation univoque entre la variation de hauteur et la variation de débit. Des études récentes, portant sur de nombreux bassins au travers le monde, ont montré la possibilité d'obtenir les débits à partir des hauteurs d'eau. Leur amélioration est une des composantes importantes de la préparation de la mission Swot. Les couplages Météo-Altimétrie offrent de bonnes perspectives sur la connaissance du débit.

## Quelle précision ?

La précision de la mesure altimétrique en hydrologie dépend considérablement du plan ou cours d'eau que l'on veut observer ainsi que de son environnement proche. La géométrie de la trace au sol par rapport à l'eau, des rives et de leurs reliefs, végétation... tout cela entre en ligne de compte.

Plusieurs facteurs affectent la précision des mesures altimétriques sur les plans d'eau continentaux. Les corrections environnementales sont une des causes d'erreur possible. Plus importantes sont les incertitudes induites par la largeur du faisceau radar. Sa taille de plusieurs kilomètres fait que la plupart des échos proviennent d'un mélange eau - îles – berges (si celles-ci sont plates). Ces mélanges, de même que les échos très réfléchissants au nadir sur des plans d'eau lisses, rendent difficile la détermination de la hauteur par les algorithmes existants. Les résultats obtenus avec les uns ou les autres sont dépendants de l'environnement de la station virtuelle (végétation, relief, type du lit, berges encaissées ou plates ...). De plus, l'expérience montre que les biais rencontrés pour une station virtuelle, le sont pour un capteur (une mission).

La distance satellite-surface est estimée avec une précision de 2 centimètres sur océans. Elle atteint environ 5 cm sur les grands lacs (grande surface d'eau « perçue » par l'altimètre comme un océan). Sur les cours d'eau, la précision pour les altimètres conventionnels ne descend habituellement pas en deçà des 15 à 20 cm pour les stations virtuelles les meilleures (présentant le meilleur contraste radiométrique), et peut aller jusqu'à 60 à 80 cm pour les stations virtuelles les moins précises. Les technologies SAR et InSAR commencent à faire l'objet d'études, avec des résultats a priori meilleurs que l'altimétrie classique, mais toujours dépendants d'un grand nombre de facteurs liés au cours d'eau et à son environnement.

À noter enfin que les données altimétriques sont fournies avec différents délais après la mesure. Le délai le plus rapide est 2 h, puis 24 à 48 h et enfin 30 à 75 jours. Ces délais supplémentaires permettent de collecter des données auxiliaires (modèles météorologiques notamment), mais surtout de calculer plus précisément l'altitude car, en attendant plus longtemps on connaît la trajectoire du satellite sur son orbite ce qui permet des calculs plus précis.



Sur les surfaces hydrologiques l'amélioration entre les données à 24/48 h et les données à 30 jours n'est pas forcément significative. Le choix entre ces types de données vient alors du type d'utilisation que l'on souhaite faire, entre une utilisation opérationnelle (qui suppose des données à livraison rapide), et une étude sur le long terme (où seules les données avec le délai le plus long seront disponibles sur toute la vie d'un satellite).

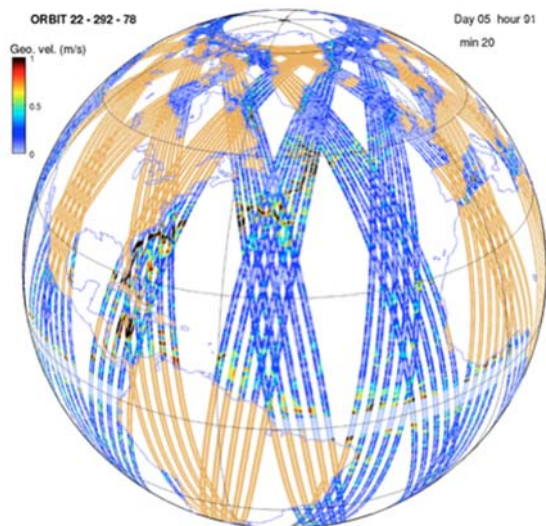
## Les données disponibles

En altimétrie classique pour l'hydrologie, deux grandes catégories de données sont disponibles :

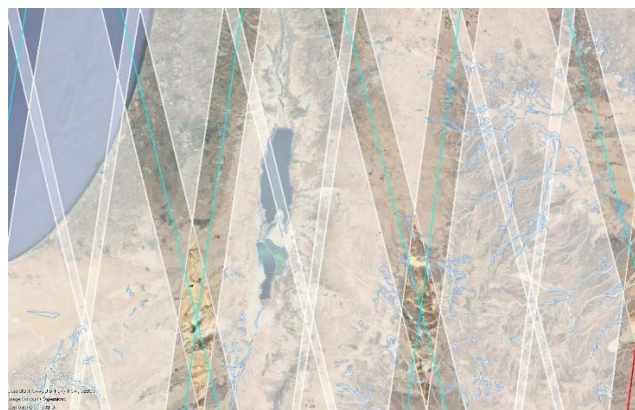
- Les données « Geophysical Data Records » (GDR) et « Sensor Geophysical Data Records », qui contiennent tous les éléments nécessaires au calcul d'une hauteur d'eau tous les 1 s et 1/20<sup>e</sup> s le long de la trace de chaque satellite ; aujourd'hui ces données sont fournies dans un format « NetCDF », autodécrit et standardisé (cela n'est pas encore le cas de toutes les données des années 1990). Des variantes contenant des algorithmes très récents existent également, qui peuvent être plus intéressantes pour l'hydrologie. Ces données sont complètes, mais assez complexes d'utilisation.
- Des données de hauteurs d'eau « pré-calculées », sur certains cours d'eau et lacs, souvent fournies en format texte (notamment csv). Elles sont d'utilisation beaucoup plus simples, mais ne sont pas calculées partout. Libres d'accès et gratuites, ces bases de données ont l'objectif de recenser les hauteurs d'eau par satellite d'un maximum de cours d'eau afin d'offrir aux divers usagers (gouvernements, instituts de recherche, bureaux d'études, etc.) la possibilité de suivre les ressources en eau (par exemple [hydroweb.theia-land.fr](http://hydroweb.theia-land.fr)).

## Demain avec Swot

La future mission altimétrique Swot (Surface Water and Ocean Topography, Nasa/Cnes/CSA/UKSA) sera profondément différente des précédentes. Concrètement, Swot fournira non seulement des mesures de hauteur, mais pourra aussi estimer des largeurs ou des étendues d'eau. De plus, la donnée sera une image : une grille de mesures s'étendant sur deux bandes de 50 km de part et d'autre d'une bande de 20 km au milieu de laquelle seule la mesure classique au nadir sera effectuée. Outre l'avantage d'obtenir une donnée en deux dimensions et donc notamment des pentes dans toutes les directions, cela permettra également de couvrir la quasi-totalité de la surface du globe, sans les trous dans le maillage des satellites précédents, ou presque.



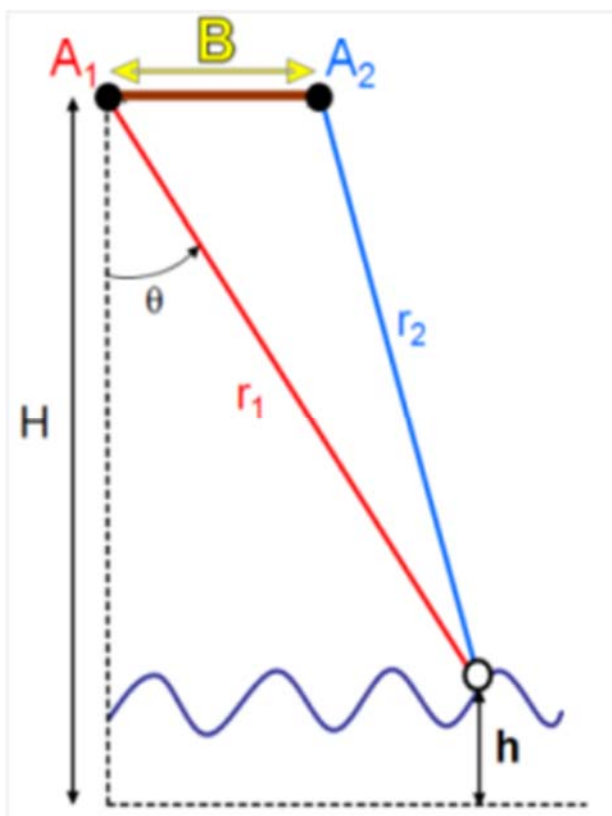
Traces Swot sur 5 jours (sur les 22 du cycle complet)



Traces Swot (mer Morte) : en blanc les zones couvertes

Le satellite possèdera deux antennes de part et d'autre du module principal. Elles fonctionnent sur le principe du radar à synthèse d'ouverture interférométrique (« InSAR »), mais émettant beaucoup plus près du nadir que les autres instruments de ce type, entre 0 et 4° (contre 30° en général). Comme dans les altimètres en « mode SAR » ou « à retard Doppler », la position de chaque point de la surface sur lequel la réflexion s'est faite est déduite de l'effet Doppler.

L'émission de l'onde radar se fera depuis une seule des deux antennes, en alternance en direction de sa propre fauchée au sol et de celle de l'autre antenne. L'onde est reçue par les deux antennes après réflexion sur la surface. Les interférences entre ces deux ondes permettent de mesurer des différences de distance.



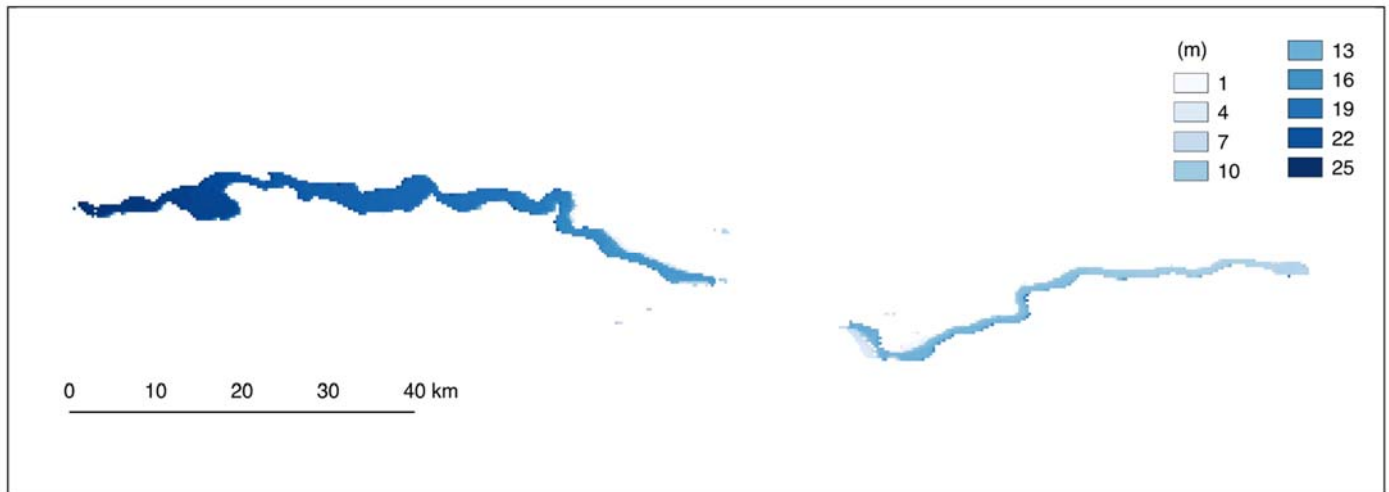
A1 et A2 représentent chacun une antenne. B est la distance entre les deux, fixe et connue ;

$r_1$  est mesuré comme en altimétrie classique par le temps aller-retour, et H est connu par un système d'orbitographie.

On déduit par ailleurs l'angle  $\vartheta$  de la mesure de la différence de phase entre les deux ondes reçues par chaque antenne, différence mesurée grâce aux interférences entre ces ondes. Cependant, par définition, cette phase n'est connue qu'à  $2\pi$  près. La connaissance de la topographie moyenne (MNT) permettra de lever cette ambiguïté.

Une fois toutes ces quantités connues, on en déduit h :  $h = H - r_1 \cos(\vartheta)$

L'objectif affiché pour Swot à l'horizon 2021 est une précision meilleure que 10 cm sur une surface de 1 km<sup>2</sup>, pour une résolution élémentaire de 5 m (le long de la trace) x 10-70 m sur continent.



**Données Swot simulées sur rivière : exemple de données « raster » sur le Pô (Italie) ; hauteurs d'eau (m) sur une grille de 10 arcsecondes**

### Les produits hydrologiques fournis par Swot

Quatre produits principaux sont définis. Le plus brut est au format NetCDF, les 3 autres sont au format shapefile, compatible avec les SIG. Les produits spécifiques aux rivières et aux lacs sont liés à des bases de données *a priori*, qui seront mises à jour au cours de la mission.

#### Produits « rivière »

Chaque rivière (ou fleuve) de plus de 30 m de large est définie dans une base de données *a priori* soit sous forme de ligne centrale de la rivière découpée selon des tronçons d'environ 10 km, soit de nœuds tous les 200 m le long de cette ligne.

Les produits rivières sont fournis selon ces deux granularités pour les rivières identifiées dans la base de données *a priori*, avec pour le produit par « nœud » des variables comme la largeur, la hauteur, la surface inondée... moyennes autour de chaque nœud, et pour le produit par « tronçon » la hauteur moyenne, la pente moyenne, le débit moyen... sur chacun de ces tronçons de rivière.

Ces produits sont fournis par passage du satellite

Le produit « tronçon » est aussi fourni par cycle, auquel cas les valeurs des variables sont fournies sur chacun des différents passages ayant mesuré tout ou partie du tronçon de cette rivière durant un cycle entier du satellite (21 jours).



Définition du tronçon d'une rivière



Définition des nœuds d'une rivière

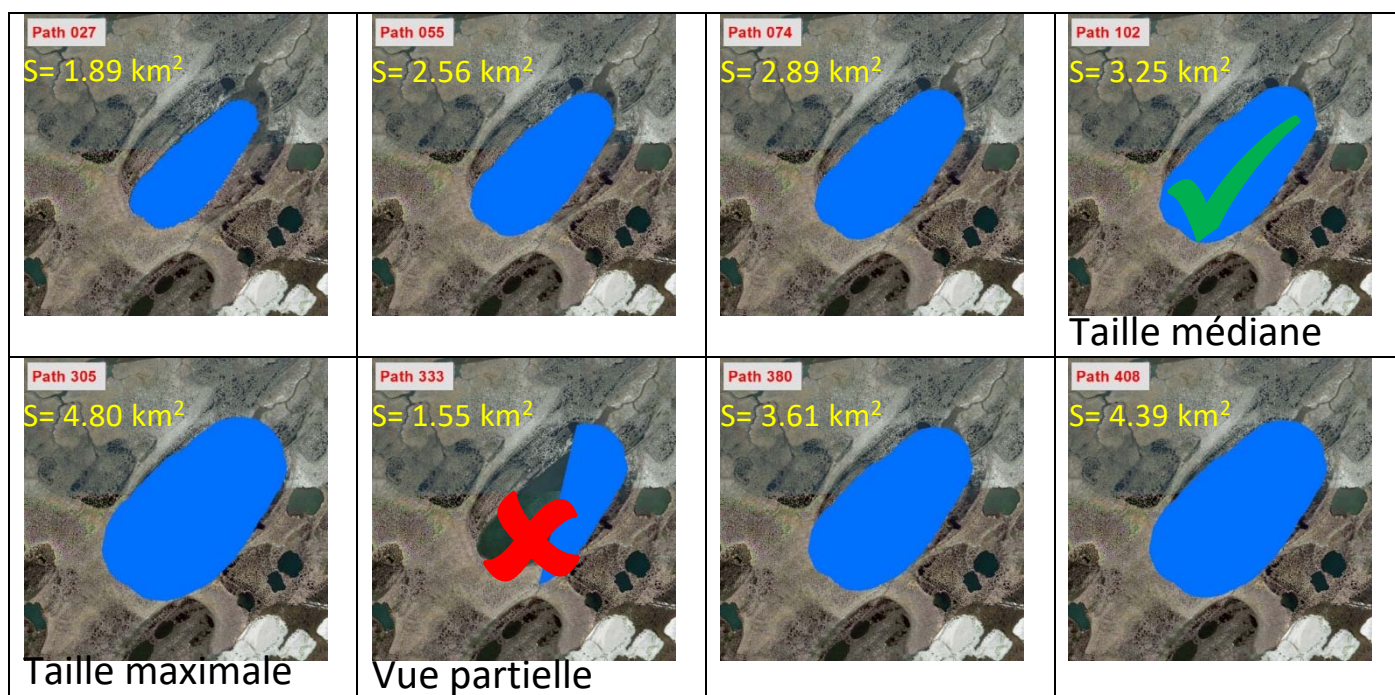
### Produits « lac »

Les surfaces d'eau hors rivières connues et qui font plus d'un hectare sont traitées comme « lacs ».

Le produit par passage du satellite donne des informations (hauteur, superficie, contour...) pour chaque observation de ces surfaces d'eau.

Pour chaque objet qui peut être rattaché à un élément de la base de données lacs a priori, l'information d'identification est ajoutée.

Le produit par cycle inclut un contour médian, la hauteur moyenne des lacs sur les passages où ils sont vu en entier (les observations d'une partie du lac seulement ne sont pas prises en compte). D'autres cas de figures plus complexes (vues de différentes parties du lac à chaque passage) seront pris en compte.



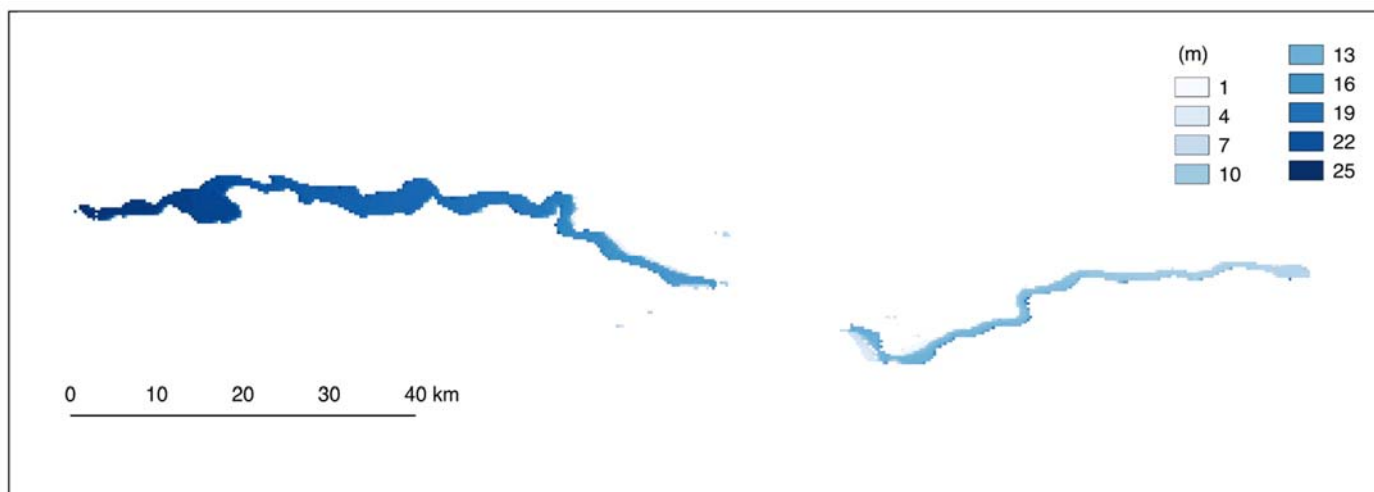
### Schéma multi-temporel composite taille médiane appliqué :

Aire max. : 4.80 km<sup>2</sup>, aire min. : 1.89 km<sup>2</sup>, écart-type de l'aire : 0.94 km<sup>2</sup>, aire médiane : 3.25 km<sup>2</sup>.

Illustration

Illustration de la définition des contours d'un lac (Figure courtesy of Y. Sheng)

### Produit « raster »



**Données Swot simulées sur rivière : exemple de données « raster » sur le Pô (Italie) ; hauteurs d'eau (m) sur une grille de 10 arcsecondes**

Un produit « raster » (cf l'exemple du Pô ci-dessus) sera généré de manière systématique à partir du produit « pixel cloud ». Il sera au format NetCDF 2D, couvrira 4 tuiles de nuage de points (les 2 fauchées et 120km le long de la trace) et sera fourni pour 2 résolutions : 100m et 250m. Les points du pixel cloud sont projetés sur une grille régulière selon une projection UTM. C'est un produit par passage.

Il pourra aussi être généré à la demande (via le portail de diffusion des données, AC) :

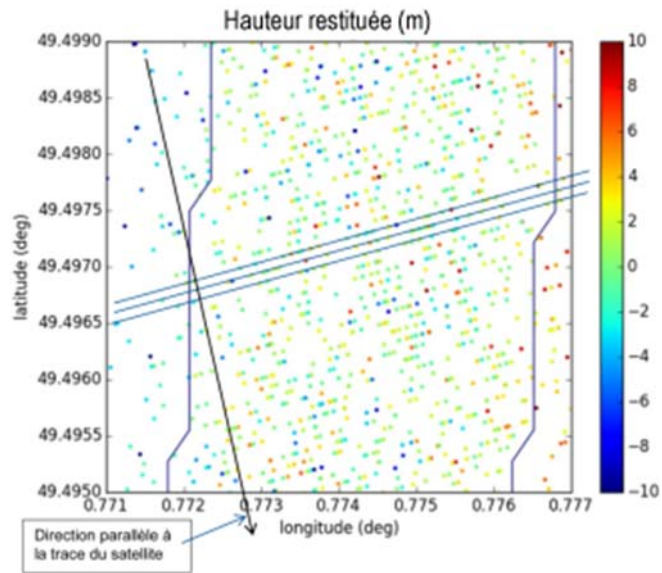
- format : NetCDF, GeoTiff, ...)
- variables
- résolution (> 100m) et zone définie par l'utilisateur, avec une limitation en poids des données téléchargées.

### Produit « Nuage de points »

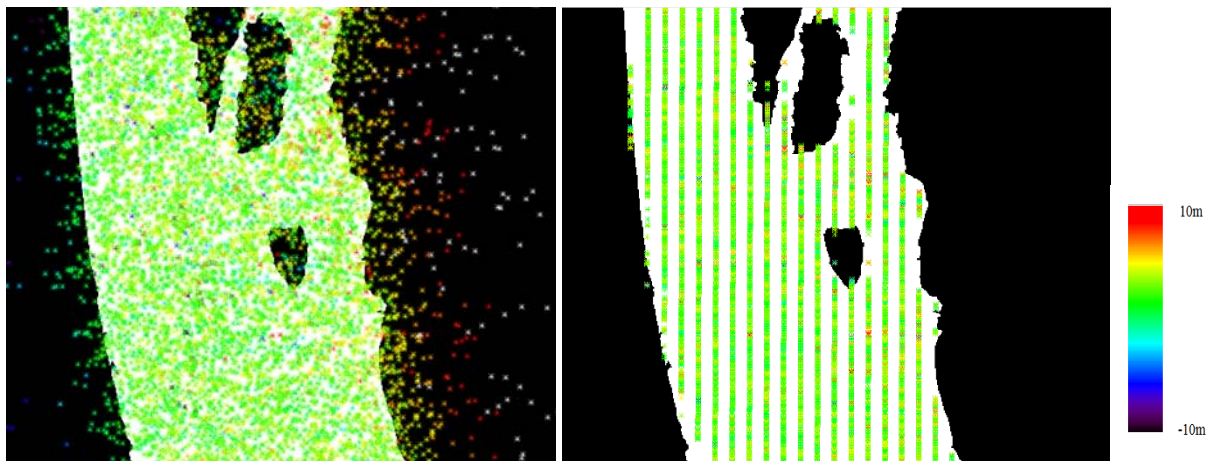
C'est le produit le plus brut sur les surfaces continentales. Un fichier, au format NetCDF, couvre une tuile, qui correspond à un côté de fauchée (gauche ou droite) sur 60 km le long de la trace au sol du satellite.

Le produit fournit la longitude, latitude, hauteur, taille du pixel et corrections pour chaque point classifié comme étant de l'eau, pour les points sur une zone tampon autour de ces zones d'eau ainsi que sur des zones systématiquement incluses (définies selon un masque *a priori*).

Ce produit est généré pour chaque passage du satellite.



produit nuage de point sur une des fauchées



(à gauche, nuage de points brut, à droite géolocalisation améliorée)