



HAL
open science

Apport des données satellites radar (SAR-Altimètre) pour la gestion des stocks d'eau en zone agricole irriguée

Jérôme Maubant

► **To cite this version:**

Jérôme Maubant. Apport des données satellites radar (SAR-Altimètre) pour la gestion des stocks d'eau en zone agricole irriguée. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. dumas-00941870

HAL Id: dumas-00941870

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00941870>

Submitted on 4 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR GEOMETRE TOPOGRAPHE

par

Jérôme MAUBANT

**Apport des données satellites radar (SAR - Altimètre)
pour la gestion des stocks d'eau en zone agricole irriguée.**

Soutenu le 28 juin 2013

JURY

PRESIDENTE : Mme. Joëlle NICOLAS-DUROY

MEMBRE : M. Laurent POLIDORI Professeur référent

**Maîtres de stage : M. Frédéric BAUP
M. Frédéric FRAPPART**

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux co-encadrants de stage, Frédéric Baup et Frédéric Frappart pour m'avoir fait partager leur expérience dans le domaine de la recherche scientifique. Leur enthousiasme ainsi que leurs encouragements m'ont permis de mener à bien ce travail tout en développant mes propres méthodes de travail et de réflexion.

Je remercie également Laurent Polidori en tant que directeur de l'ESGT mais surtout en tant que professeur référant de ce stage pour ses conseils avisés lors de la rédaction de ce mémoire.

Merci à mes collègues de bureau Yannick Philippets dit « Yannou », Elodie Gutierrez, Mathieu Montbroussous, Jean-Francois Fayel et Guillaume Bigeard pour tous les bons moments passés ensemble ainsi que pour leur soutien.

Merci aussi à toute l'équipe du CESBIO et du LBAE (Laboratoire de Biotechnologies Agroalimentaires et Environnementales) pour la bonne humeur partagée et plus particulièrement à Benoit Coudert, Vincent Bustillo et Nathalie Jarosz

Merci également à l'ensemble des vététistes du jeudi soir à qui ont su me faire découvrir la région de la plus belle des façons.

D'une manière plus générale, merci à ma famille qui m'a toujours accompagné dans mes choix. Et enfin un remerciement tout particulier à ma chère Juliette qui a été d'un soutien sans faille et a su m'encourager durant toute la durée de ce stage.

LISTE DES ABREVIATIONS

CBR : *Capteur Basse Résolution*

CESBIO : *Centre d'Études Spatiales de la BIOSphère*

CHR : *Capteur Haute Résolution / HR Haute Résolution*

CNES : *Centre National d'Études Spatiales*

CTOH : *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère*

DT: *Donnée Terrain*

ESA : *Agence Spatiale Européenne*

ESGT : *Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes*

GET : *Géoscience Environnement Toulouse*

InSAR : *Interferometric Synthetic Aperture Radar*

JPL : *Jet Propulsion Laboratory*

LBAE : *Laboratoire de Biotechnologies Agroalimentaires et Environnementales*

MCM'10 : *Multispectral Crop Monitoring – 2010*

NASA : *Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace*

OMP : *Observatoire Midi-Pyrénées*

r^2 : *Coefficient de détermination*

RAR / ROR : *Real Aperture Radar / Radar à Ouverture Réel*

RMSE / EMQ : *Root-Mean-Square Error ou Erreur Quadratique Moyenne*

SAR / RSO : *Synthetic Aperture Radar / Radar à Synthèse d'Ouverture*

SIAH du Touch : *Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique de la vallée du Touch et de ses affluents*

TFE : *Travail de Fin d'Étude*

T/P : *Topex Poséidon*

J1 J2 : *Jason-1 Jason-2*

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	2
LISTE DES ABREVIATIONS	3
TABLE DES MATIERES	4
INTRODUCTION	6
1. RAPPEL THEORIQUE, L'IMAGERIE ET L'ALTIMETRIE RADAR.....	8
1.1. Le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO)	8
1.1.1. Historique.....	8
1.1.2. Radar imageur théorie	8
1.2. L'Altimétrie Radar	12
1.2.1. Historique.....	12
1.2.2. Principe de l'altimètre radar	12
2. LA ZONE D'ETUDE	20
2.1. Présentation générale.....	20
2.2. Caractéristiques physiques	20
3. DONNEES DISPONIBLES POUR CETTE ETUDE	21
3.1. Données terrain.....	21
3.2. Données satellitaires.....	22
3.2.1. Estimation satellitaire de la surface des lacs	22
3.2.2. Données satellitaires de hauteur des lacs	23
4. TRAITEMENT DES DONNEES DE SURFACE MULTICAPTEURS	25
4.1. Protocole utilisé.....	25
4.2. Interprétation.....	26
5. EXTRACTION DE DONNEES ALTIMETRIQUES.....	27
6. VALIDATION DES MESURES ALTIMETRIQUES.....	31
7. ÉTUDE ANNUELLE - ESTIMATION DU VOLUME DES LACS EN 2010 : APPROCHE ALTIMETRIQUE ET SAR HR.....	32

7.1.	Comparaison et analyse du cycle annuel (2010)	32
7.2.	Relation entre surfaces et hauteurs satellitaires	33
7.3.	Relation entre données satellitaires et données terrain	36
7.3.1.	SAR / VOLUME.....	36
7.3.2.	ALTIMETRE / VOLUME.....	38
7.4.	Estimation des volumes	39
7.4.1.	Variation de volume estimée à partir de données satellitaires uniquement.....	39
7.4.2.	Suivi du volume d'eau disponible à partir de données satellitaires et terrain combinées.....	41
8.	ÉTUDE PLURIANNUELLE – ESTIMATION DU VOLUME DU LAC DE LA BURE ENTRE 2003 ET 2011. APPROCHE ALTIMETRIQUE.	44
8.1.	Comparaison et analyse des cycles annuels	44
8.2.	Relation entre données satellitaires et données terrain (ALTIMETRE/VOLUME)	46
8.3.	Estimation des volumes, données satellitaires et terrain	48
9.	DISCUSSIONS - PERSPECTIVES	51
9.1.	Sélection des surfaces SAR HR	51
9.2.	Sélections des lacs suivis par altimétrie radar.	51
9.3.	Nécessité de disposer de données régulières et de qualité.	52
9.4.	Comparaison des données	52
	CONCLUSION	53
	BIBLIOGRAPHIE	54
	TABLE DES ANNEXES	57
	LISTE DES FIGURES.....	68
	LISTE DES TABLEAUX.....	69
	RESUME.....	70

INTRODUCTION

Considérée comme inépuisable il y a de cela quelques décennies, l'eau est aujourd'hui une richesse de plus en plus précieuse pour les écosystèmes et les activités humaines, du fait notamment de la forte et constante augmentation de la population mais aussi du réchauffement climatique. Dans ce contexte, la description précise du cycle global de l'eau sur les terres émergées ainsi que l'estimation et la maîtrise des ressources disponibles s'avèrent aujourd'hui être deux des thèmes de recherche majeurs dans la communauté scientifique.

Les techniques de télédétection spatiale, qui n'ont cessé de s'améliorer durant les 40 dernières années, semblent être aujourd'hui les plus performantes pour contrôler de façon permanente les ressources en eau et cela sur toute la surface du globe. Parmi ces techniques, la technologie radar est la plus à même d'offrir un suivi continu et régulier des ressources en eau. En effet, du fait de leur capacité à s'affranchir des conditions météorologique et des résolutions¹ toujours plus grandes, elles ouvrent désormais la voie d'une gestion fine et ciblée des volumes d'eau. Sous ce terme générique de technologie radar, deux grandes familles se distinguent : l'altimétrie et l'imagerie. Si l'altimétrie radar a été développée à l'origine pour l'étude et l'évaluation de la hauteur des océans, elle tend aujourd'hui à montrer qu'elle pourrait à terme être aussi efficace sur terre. De son côté l'imagerie radar a démontré elle aussi sa capacité à repérer et quantifier les eaux de surfaces. Ainsi, nous disposons aujourd'hui de techniques qui seules ou combinées devraient être en mesure dans les années à venir de nous ouvrir l'accès à une grande variété d'applications hydrologiques sur des objets de plus en plus petits et avec une précision de plus en plus grande.

Les grandes puissances de ce monde ne s'y trompent pas. En témoignent les nombreux satellites radar (imageurs et altimètres) déjà lancés (ENVISAT, JASON-2, RADARSAT-2, TERRASAR-X, etc.) ou en projet (JASON-3, RADARSAT-X, ALTIKA, SENTINEL-1, SENTINEL-3, SWOT, etc.). C'est dans ce cadre que s'inscrit l'étude réalisée à l'occasion de mon travail de fin d'études (TFE). Son objectif est d'améliorer l'estimation et le suivi des volumes d'eau disponibles pour l'irrigation au moyen de la télédétection radar multi-capteurs. Pour ce faire, une zone d'étude au sud-ouest de Toulouse a été choisie comme zone test. Déjà utilisée antérieurement au travers de différentes missions (MCM'10 notamment)², cette zone est aujourd'hui parfaitement connue et dispose d'un grand nombre de mesures sur une longue période.

Cette étude, qui a pour but de caractériser les réponses altimétriques et SAR en milieu fortement hétérogène s'inscrit dans le cadre de la préparation des futures missions, Sentinel-1, Sentinel-3 et SWOT.

¹ Résolution spatiale de l'ordre de 1 m pour Terrasar-X et précision de l'ordre de 2 cm pour une mesure de distance par altimétrie radar sur les océans.

² Campagne d'acquisition multi-satellites pour l'analyse du paysage agricole dans le cadre du projet "Sud Ouest". Cette expérience, intitulée MCM'10 (Multispectral crop monitoring - 2010), s'est déroulée de Janvier à octobre 2010 afin d'échantillonner toutes les conditions climatiques (4 saisons) et agricoles (cultures d'hiver, d'été et suivi du travail du sol nu) de la région d'étude située au sud ouest de Toulouse, en France.

**RAPPEL THEORIQUE,
L'IMAGERIE ET L'ALTIMETRIE RADAR**

1. Rappel théorique, l'imagerie et l'altimétrie radar

1.1. Le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO)

1.1.1. Historique

La technologie radar a fait son apparition bien avant les premiers satellites. C'est en effet en 1886 que le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz réussit la première expérience de transmission d'hyperfréquences et de réflexion sur différents objets. Les premiers radars à détection d'objets éloignés ont été développés entre 1920 et 1930 (pour la détection et le positionnement d'avions et de navires), et le premier SAR a été conçu par les militaires au cours des années 1960.

Le premier satellite civil d'observation de la Terre équipé d'un radar SAR, SEASAT développé par le JPL (Jet Propulsion Laboratory, NASA), a été lancé en Juin 1978 et est resté opérationnel pendant quatre mois. Sa mission principale était de démontrer l'utilité des instruments micro-ondes passifs (Visible and Infra Red Radiometer, VIRR) et actifs pour l'observation des océans. Depuis, de nombreuses missions ont employé des capteurs RSO imageurs (annexe 1).

1.1.2. Radar imageur théorie

1.1.2.1. Domaine des micro-ondes

Les radars sont des systèmes travaillant dans le domaine des micro-ondes (longueurs d'onde allant usuellement du centimètre au mètre). Il est découpé en bandes, correspondant à des intervalles de longueurs d'ondes spécifiques et à autant de propriétés différentes pour les objets étudiés (pénétration, rétrodiffusion,...).

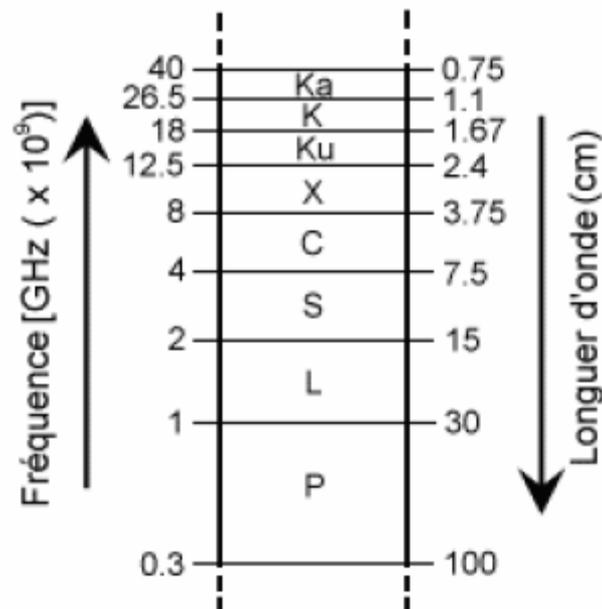


Figure 1: Spectre électromagnétique et détail des bandes en Hyperfréquences - Source F. Baup, 2006

Les données disponibles sur les bandes L et C s'étalent sur près d'une vingtaine d'années, tandis que la mise en orbite d'instruments en bande X est bien plus récente et compte à l'heure actuelle le plus grand nombre de projets de satellites (annexe 1).

1.1.2.2. Principe de fonctionnement du radar

Un radar est un instrument de télédétection active : le système produit lui-même le rayonnement pour illuminer la cible. Il est composé d'une antenne de longueur L qui émet latéralement un train d'ondes (ou impulsions) cohérentes, de largeur de bande B (qui définit la durée de l'impulsion). L'antenne réceptrice mesure les échos (sous forme d'un champ électrique) diffusés par la surface observée dans sa direction, en les classant par ordre d'arrivée.

La configuration générale d'un système radar consiste en une antenne d'émission et une antenne de réception distinctes. C'est la configuration dite bistatique. Mais les satellites embarquent le plus souvent un radar en configuration monostatique : une unique antenne est utilisée pour l'émission et la réception.

Un radar imageur est bi-dimensionnel et effectue plusieurs mesures. En premier lieu et comme indiqué précédemment, il situe les objets en distance par rapport à l'antenne, par la mesure du temps nécessaire à la propagation aller et retour de l'onde entre celle-ci et la cible. De plus, il enregistre l'amplitude du signal reçu et sa phase.

S'agissant d'un capteur actif, le radar opère aussi bien de jour que de nuit. De plus, les grandes longueurs d'ondes utilisées ne sont pas (ou très peu) affectées par la diffusion atmosphérique. Hormis en cas de conditions météorologiques extrêmes, tel qu'un fort orage tropical, l'acquisition de données au niveau du sol n'est pas tributaire de la présence de nuages, à l'inverse des instruments optiques. C'est pourquoi le radar est qualifié de « capteur tous temps ».

1.1.2.3. Géométrie d'acquisition d'un radar

Les systèmes radars imageurs classiques possèdent plusieurs appellations : Radar à Ouverture Réelle (ROR) en français, ou bien Real Aperture Radar (RAR) en anglais. La géométrie de visée est toujours latérale. En effet, l'instrument ne classe les échos que par leur temps de parcours ; en cas de visée au nadir, il ne peut pas déterminer si ceux-ci proviennent de la droite ou de la gauche de sa trajectoire. Cette géométrie particulière, due à l'angle d'incidence α élevé, impacte sa résolution spatiale et la taille des pixels de l'image [Maitre 2000].

La résolution spatiale d'un instrument est définie comme la plus petite distance permettant de séparer deux objets, c'est-à-dire dans le cas d'un capteur radar qui permet de distinguer deux échos successifs. Elle résulte de deux résolutions distinctes, où H représente la hauteur de vol de l'instrument, λ la longueur d'onde employée, α l'angle incidence et $1/B$ la durée d'impulsion.

$$R_d = \frac{c}{2 \times B \times \sin \alpha} \quad R_{az} = \frac{H \times \lambda}{L \times \cos \alpha}$$

La résolution longitudinale (ou en distance) R_d est perpendiculaire à l'axe de vol et dépend notamment de la durée de l'impulsion (égale à $1/B$). La résolution azimutale R_{az} est parallèle à la direction de vol et dépend principalement de la longueur de l'antenne H .

La résolution en distance est exprimée dans la géométrie radar et non au sol. Elle correspond à la taille de la cellule de résolution sur l'axe de la portée. La résolution azimutale au sol est inversement proportionnelle à la longueur de l'antenne. Ainsi pour qu'un RAR embarqué sur un satellite fournisse des images exploitables, cela nécessiterait une antenne longue de plusieurs kilomètres (impossible à mettre en orbite). Pour comparaison, les antennes radars actuellement embarquées sur les satellites ne dépassent pas 15 mètres d'envergure.

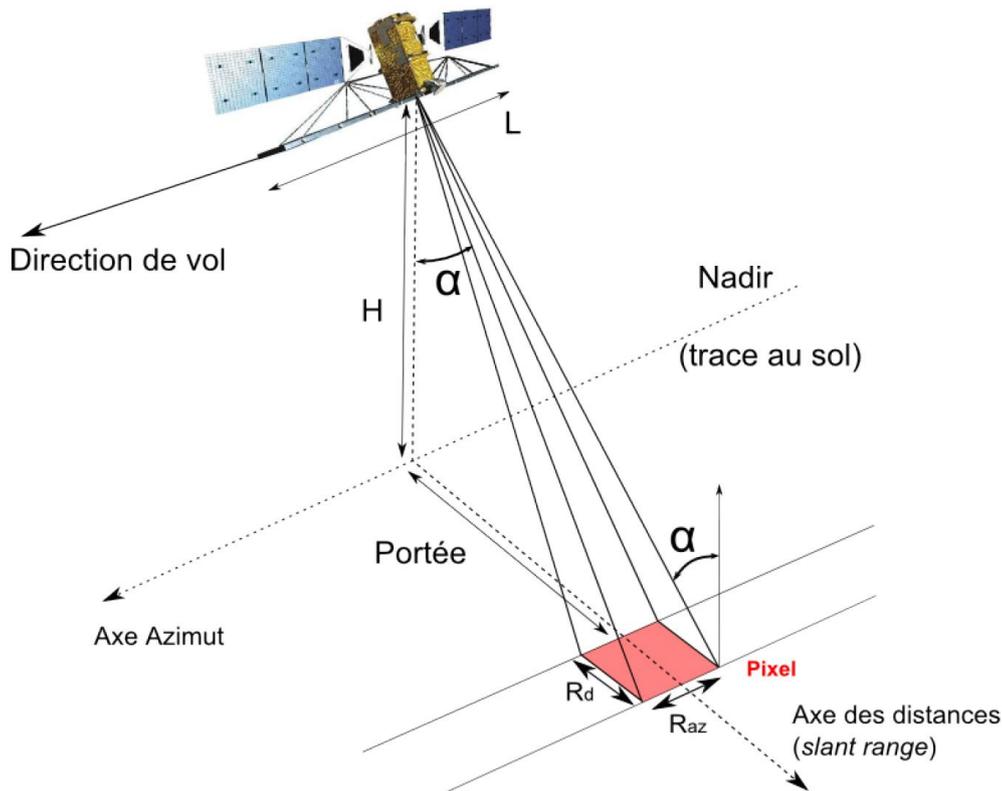


Figure 2: Résolution d'un radar (RAR) – illustration Yannick Philippets, Floriane Flis (ENSG)

1.1.2.4. Principe du radar à ouverture synthétique

Le SAR (Synthetic Aperture Radar) ou RSO en français se distingue du radar à ouverture réelle par la plus grande résolution spatiale qu'il atteint. Son principe découle des travaux de Carl Wiley en 1951. Comme son nom l'indique, cet instrument synthétise une antenne plus grande afin d'augmenter la résolution de l'image acquise grâce notamment à l'utilisation de l'effet Doppler³. Ces capacités de haute résolution depuis l'espace ont pu être confirmées grâce au satellite SEASAT (lancé en 1978). Depuis, différentes missions embarquant un SAR se sont succédées, parmi elles ENVISAT, ALOS, RADARSAT-2, TERRASAR-X en ce qui nous concerne.

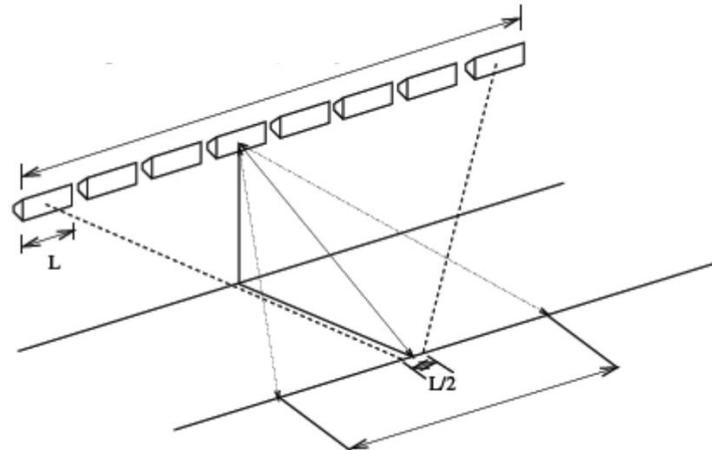
1.1.2.5. Résolution azimutale du SAR

Parmi les différentes façons d'aborder le principe d'ouverture synthétique, F.Ulaby propose la comparaison du radar à ouverture synthétique à un réseau d'antennes comme illustré en figure 3.

Afin d'améliorer la résolution azimutale, des opérations de traitement du signal (basée sur l'effet Doppler) permettent d'estimer la position d'un point à travers une succession d'échos radar (autant d'échos que de mesures effectuées dans l'intervalle de temps où la cible se situe dans le champ du faisceau radar).

³ Décalage entre la fréquence de l'onde émise et de l'onde reçue lorsque la première rencontre un objet en mouvement par rapport à l'émetteur/récepteur

Longueur de l'antenne synthétique (L_{syn})



Résolution d'un radar à ouverture réelle

Figure 3: illustration de la comparaison proposée par F.Ulaby – source - Céline Danilo, 2009

On procède ensuite à la synthèse cohérente des signaux radar (phase et amplitude) ce qui permet de produire un faisceau fictif (synthétique) beaucoup plus fin que celui d'une antenne classique. L'utilisation de ce principe donne au radar à ouverture synthétique une résolution azimutale R_{az} indépendante de la distance radar-cible et fonction uniquement de la longueur L de l'antenne radar : plus celle-ci est petite et meilleure est la résolution (figure 3). A titre d'exemple, Radarsat-2 et Terrasar-x embarquent des antennes respectives de 15 et 5 mètres pour des précisions environ égales à 7.5 et 2.5 mètres.

$$R_{az} \approx \frac{L}{2}$$

1.1.2.6. Polarimétrie

Plusieurs images simultanées sont générées en utilisant des faisceaux polarisés différents, habituellement orthogonaux. Comme les cibles rencontrées (sol, feuillage, surface en eau, édifices, etc.) ont des propriétés polarisantes différentes, l'intensité venant des différentes ondes va varier avec le type de cibles rencontrées (matériaux, formes, mécanismes de « rebonds »). On étudie alors les différences d'intensité entre les images générées à partir de ces différentes polarisations pour en déduire des paramètres descriptifs de la scène imagée. On peut ainsi rehausser les contrastes de certains détails non visibles sur des images classiques (non polarimétriques), ou déduire des propriétés de la cible. C'est en partie grâce à de telles images que seront observées les variations de surface des lacs considérés dans cette étude.

La figure 4 représente le principe général de propagation d'un champ électrique à une interface entre deux milieux I et T (avec E_I l'onde incidente, E_R l'onde réfléchi et E_T l'onde transmise au second milieu). La polarisation d'une onde est déterminée par rapport à son plan d'incidence, qui est défini par les vecteurs k (la direction de propagation) et e_z (vecteur normal à la surface visée par l'antenne radar).

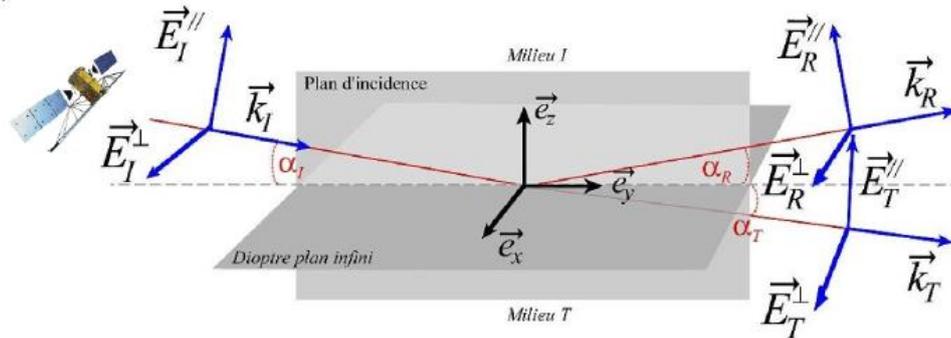


Figure 4: Principe général de la propagation d'un champ électrique à une interface entre deux milieux (dioptré).- Source G. Brotons, WWWunit.eu

1.2. L'Altimétrie Radar

1.2.1. Historique

Cette technologie a fait son apparition au début du XX^{ème} siècle suite aux travaux de Christian Hülsmeier qui réalisa en 1904 le premier test de détection d'objet à l'aide d'une onde radar. Cette technologie a ensuite connu un essor considérable durant la Guerre Froide. Tout comme pour l'imagerie SAR, l'altimétrie radar telle qu'on l'entend aujourd'hui a débuté avec le lancement du satellite SEASAT en 1978. Cette première mission avait pour objectifs de démontrer la possibilité d'observer les océans au travers notamment de la mesure de leur hauteur, température de surface et hauteur des vagues depuis l'espace, mais également de définir les besoins pour les futures missions opérationnelles de suivi des océans. Depuis, de nombreuses missions embarquant un altimètre radar ont vu le jour. Parmi elles, nous pouvons citer les missions ERS-1 (1991) et ERS-2 (1995), GeoSAT (1986), GFO (1998), Topex/Poseidon (1992), Jason-1 (1998), Jason-2 (2008) et ENVISAT(2002) (annexe 2), donnant lieu aux premières études altimétriques satellitaires des surfaces océaniques et continentales [Rapley et al., 1987], [Guzkowska et al., 1990] et [Koblinsky et al., 1993]

1.2.2. Principe de l'altimètre radar

Si le concept du radar altimètre est assez simple, sa mise en application pour l'altimétrie satellitaire repose sur la réalisation d'instruments d'une grande technicité. Originellement conçue et développée pour l'étude des surfaces océaniques, l'altimétrie satellitaire s'est avérée être une technique pertinente pour le suivi des variations de niveau d'eau des grands lacs, mers intérieures et grands bassins versants en raison de sa couverture spatiale globale (figure 5) et de sa capacité à s'affranchir des conditions météorologiques lors de la phase d'acquisition des données.

1.2.2.1. Couverture géographique quasi-globale et répétitive

Les satellites disposant d'un capteur altimétrique sont placés sur une orbite bien précise, optimisée en fonction des objectifs de la mission :

- Couvrir globalement les océans hors zones polaires et éviter les recouvrements dans le spectre des marées⁴ pour Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2

⁴ Le spectre des marées, c'est l'ensemble des fréquences présentes quand on fait une analyse temporelle du niveau de la mer (par exemple sur un marégraphe). Le but est de repasser à des temps différents au-dessus d'un même point pour observer le plus grand nombre d'harmoniques. C'est le cas de T/P, J1, J2 mais pas d'Envisat qui est héliosynchrone.

- Couvrir au mieux l'ensemble des surfaces terrestres (océans, continents, calottes) pour ERS-1&2 et Envisat.

Ces orbites constituent un maillage qui résulte d'un compromis entre la densité spatiale des traces (projection de l'orbite au sol) et leur périodicité. Ce sont ces deux paramètres qui vont être particulièrement déterminant pour le suivi des eaux continentales.

- *La distance inter-traces à l'équateur, de l'ordre de 80km pour Envisat et 315 km pour Topex/Poseidon.*
- *Le temps de revisite d'un point au nadir (c'est-à-dire à la verticale de l'orbite), qui est directement égale à la période d'échantillonnage des mesures altimétriques sur un site donné. De l'ordre de 35 jours pour Envisat et 11 jours pour Topex/Poseidon.*

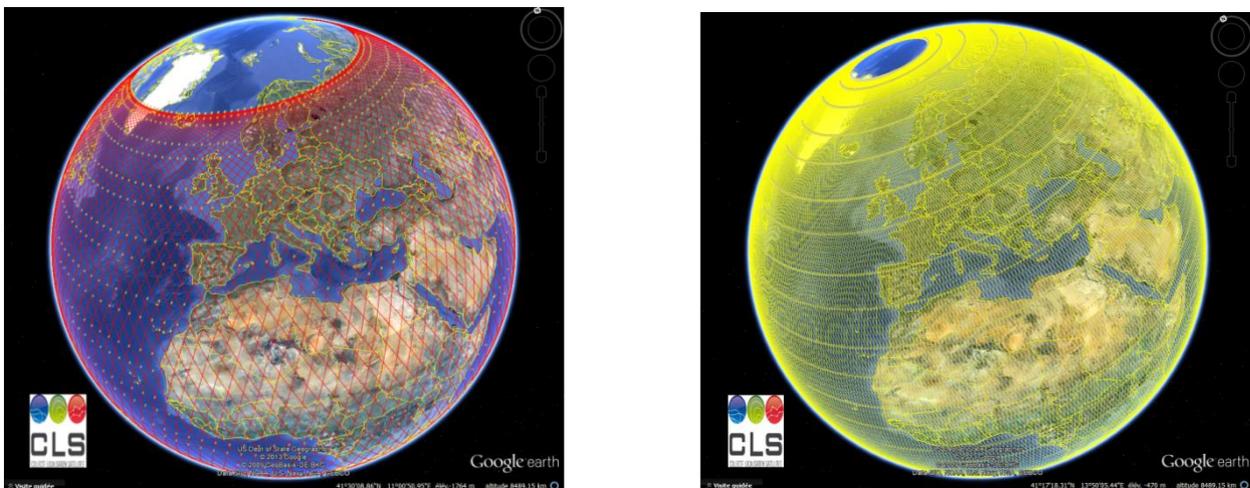


Figure 5 : Couverture globale de JASON-2 (rouge) et Envisat (Jaune)

1.2.2.2. Positionnement du satellite

L'orbitographie joue un rôle important dans l'utilisation et l'exploitation des données satellitaires. En effet, toutes les mesures aussi précises qu'elles peuvent être n'ont d'intérêt et de réelle précision que dans la mesure où l'on est capable de les positionner précisément à la surface de notre planète. En effet cette incertitude sur le positionnement du satellite et par conséquent du point de mesure se retrouve directement dans le bilan d'erreur des résultats obtenus.

Fort heureusement, les systèmes de positionnement permettent aujourd'hui (et cela depuis les années 90) grâce au développement de techniques de restitution d'orbite très précises (système DORIS, télémétrie laser, système GNSS) de connaître la position d'un satellite à 2 cm près.

1.2.2.3. Principe de la mesure altimétrique

Les antennes radar des altimètres embarqués à bord des satellites émettent des signaux, ondes électromagnétiques à très hautes fréquences au nadir et reçoivent en retour les échos réfléchis par la surface impactée (figure 6). L'analyse de cette réponse permet ensuite de déterminer très précisément le temps de propagation aller-retour ($2\Delta T$ ou $2R$ sur la figure 7) de l'onde radar.



Figure 6 : Direction et puissance du signal reflechi en fonction de la surface rencontrée

Tout l'enjeu de l'altimétrie radar réside dans la détermination la plus précise possible de cet instant $2 \cdot \Delta T$ d'après la réponse obtenue.

Ce temps est ensuite transformé en distance également appelée range (r) par simple multiplication avec la vitesse de la lumière qui en première approximation correspond à la vitesse de propagation des ondes radar sur le trajet satellite - Terre.

$$r = \Delta T \times c$$

Les altimètres radar embarqués sur les satellites utilisent différentes fréquences appartenant au domaine des micro-ondes (0.3 -1000 GHz) comprises entre 1 GHz et 40 GHz (figure 1). Le choix de l'une d'entre elles dépend de la réglementation, des objectifs de la mission, des contraintes et possibilités techniques propres à chaque instrument. Chaque bande de fréquence présente ses avantages et ses inconvénients. Citons notamment les bandes fréquemment utilisées :

- BANDE KA (35 GHz)
- BANDE KU (13,6 GHz)
- BANDE C (5,3 GHz)
- BANDE S (3,2 GHz)

1.2.2.4. Corrections

Certaines fréquences sont plus sensibles que d'autres aux perturbations engendrées par la traversée de l'atmosphère (annexe 3) et aux phénomènes de marées. Il convient donc de prendre en compte ces facteurs lors de l'exploitation du signal reçu par le satellite. Voici une liste non exhaustive des principales corrections qu'il est nécessaire de prendre en compte lors de l'exploitation du signal brut.

- CORRECTIONS DE PROPAGATION
 - CORRECTION IONOSPHERIQUE [FU ET CAZENAVE, 2001].
 - CORRECTION DE TROPOSPHERE SECHE
 - CORRECTION DE TROPOSPHERE HUMIDE [TAPLEY ET AL., 1982]
- CORRECTIONS GEOPHYSIQUES
 - CORRECTION DE MAREE SOLIDE [CARTWRIGHT ET TAYLER, 1971 ; CARTWRIGHT ET EDEN, 1973]
 - CORRECTION DE MAREE POLAIRE [WAHR, 1985].

Pour appliquer ces corrections et ainsi garantir une précision maximale sur chaque mesure, les altimètres radar utilisent généralement deux fréquences (les plus différentes possible) émises simultanément (Envisat) ou bien de modèles théoriques (Jason-2) afin d'estimer les corrections nécessaires à chaque mesure [Ollivier. A, 2006].

Une fois les corrections nécessaires appliquées, il est possible d'obtenir la distance finale (distance R, figure 7) estimée avec une précision verticale de 2 centimètres pour des surfaces dites homogènes telles que les océans.

$$h = H - R - (\text{somme des corrections})$$

h : hauteur

H : altitude de l'orbite

R : distance satellite-sol (R=range)

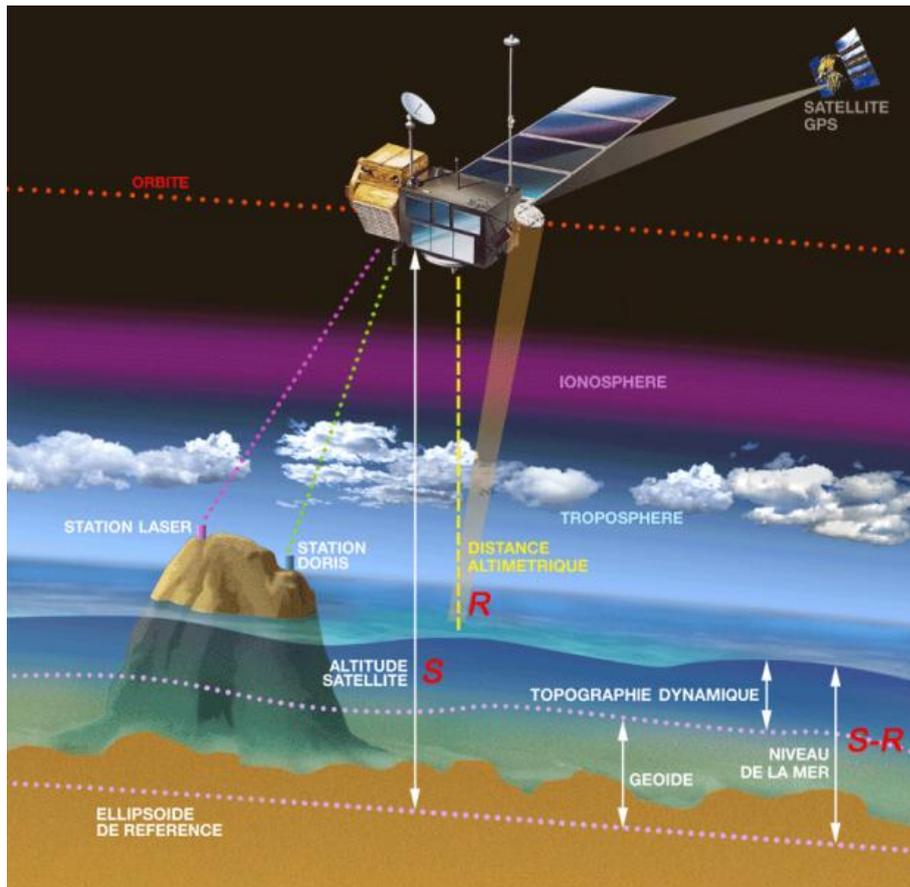


Figure 7: Principe de l'altimétrie satellitaire © CNES

1.2.2.5. Interprétation du signal

Comme présenté figure 6, le signal enregistré par l'antenne radar ne représente qu'une partie du signal émis et, est souvent difficile à interpréter individuellement. En moyennant sur plusieurs mesures, la forme du signal reçu devient exploitable et permet de réaliser une mesure très précise de la distance satellite-surface (figure 8).

En plus de cette distance, l'analyse de la forme d'onde (puissance, forme au cours du temps) présentée en annexe 4 permet de déterminer la topographie de la surface terrestre ainsi que ses caractéristiques de rétrodiffusion.

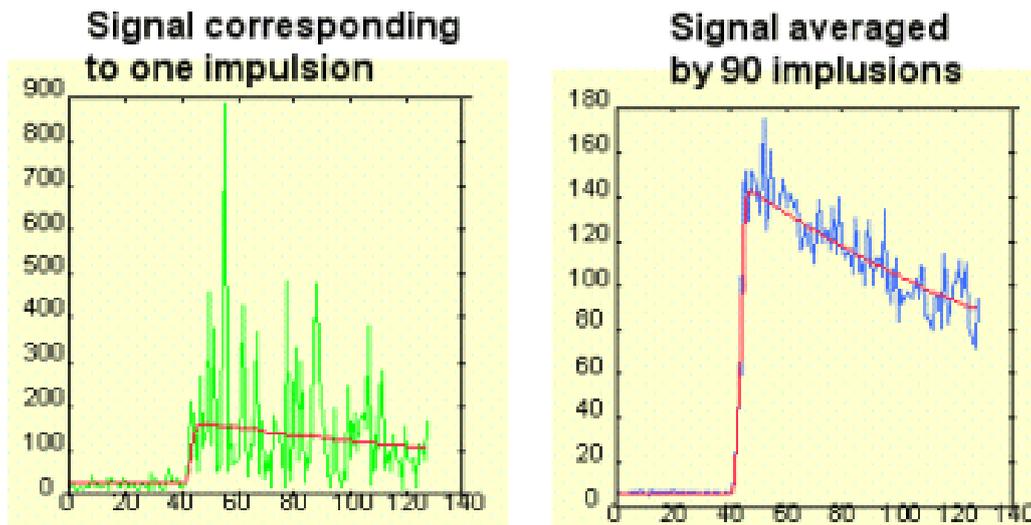


Figure 8: Exemple de diminution du bruit dans la réponse altimétrique par intégration sur 90 mesures pour Topex/Poséidon © - <http://www.altimetry.info/>

Sur les surfaces océaniques, les formes d'ondes ont une forme caractéristique qui peut être décrite mathématiquement (modèle de Brown, figure 9). Les surfaces telles que les glaces, les rivières ou les terres émergées, sont beaucoup plus hétérogènes et présentent généralement d'importantes discontinuités topographiques ou de texture, rendant leur interprétation plus difficiles.

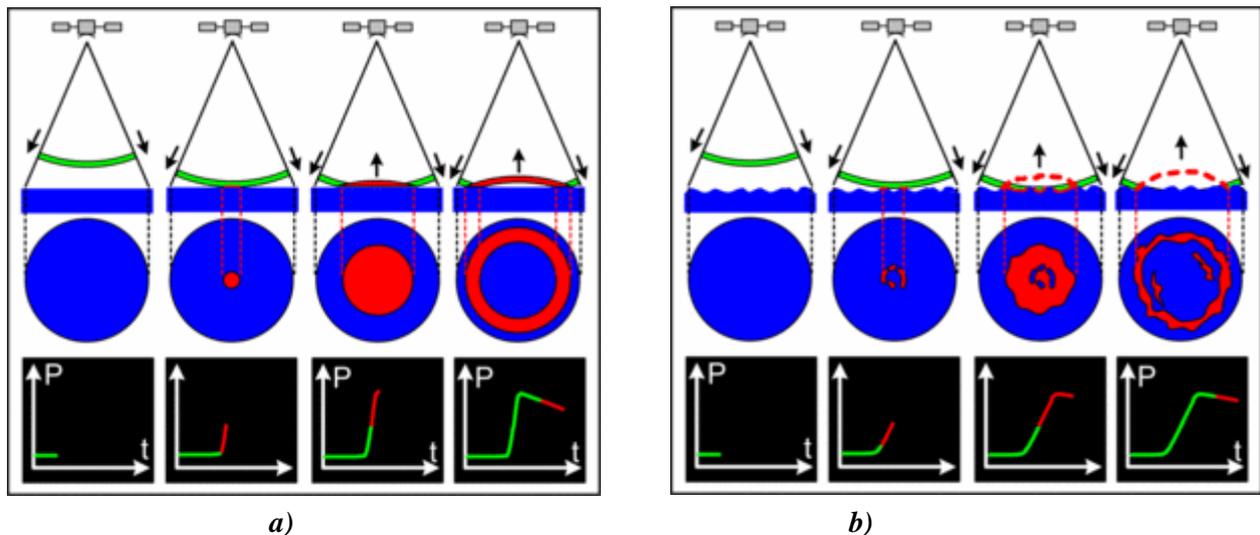


Figure 9 Formation d'une forme d'onde sur un océan de surface plane a) et sur ce même océan de surface agité b) © CNES

Le radar altimètre reçoit l'onde réfléchi (écho), lequel varie en intensité au cours du temps. Lorsque la surface de la mer est plate (gauche), l'amplitude de l'onde réfléchi augmente fortement dès le moment où le front de montée du signal radar atteint la surface. Toutefois, par temps de houle (droite), l'onde atteint d'abord la crête d'une des vagues et par la suite, les autres séries de crêtes. Cette configuration a pour effet d'augmenter progressivement l'amplitude de l'écho. La hauteur des vagues peut être déduite de cette onde réfléchi, puisque la pente de la courbe représentant cette amplitude en fonction du temps est proportionnelle à la hauteur des vagues. © CNES.

Ainsi en étudiant la forme du signal reçu il est possible de déduire en plus de la distance, certaines caractéristiques de la surface survolée (hauteur, direction des vagues, direction du vent sur les océans).

En ce qui concerne les surfaces continentales, l'interprétation est rendu beaucoup plus complexe du fait notamment de l'hétérogénéité de la surface. La présence d'un relief marqué ou encore de surfaces aux propriétés de rétrodiffusion différentes dans la zone contributive au signal sont autant de facteurs d'imprécisions sur la mesure altimétrique.

Il devient alors difficile d'assimiler le signal reçu à un modèle théorique⁵ comme c'est le cas sur les océans.

1.2.2.6. Tracking

Pour éviter de trop grosses erreurs de mesure, les altimètres utilisent un système de « tracking » qui consiste à centrer une fenêtre de réception sur la date $2\Delta T$ probable et la puissance prévue⁶ du signal retour. Ce système permet ainsi d'ajuster au mieux la fenêtre à l'écho reçu et également d'augmenter la fréquence d'échantillonnage et donc de réduire la distance inter-mesure le long de la trace.

Cet outil, qui a montré son efficacité en milieu homogène, a également montré ses limites lorsqu'il s'agit de milieux fortement hétérogènes comme les surfaces continentales. En effet dans le cas de variations inattendues du relief observé, ce système peut se retrouver temporairement incapable d'estimer la gamme de distances dans laquelle devraient se trouver les mesures à venir (t_1, t_2, t_3, \dots). Ce phénomène appelé « décrochage » se traduit par une perte de données (pas d'acquisition de signal, cf. Jason-1 sur 90% des surfaces continentales, figure 10). Suivant les capteurs, ce système est plus ou moins perfectionné. A titre d'exemple, le « tracking » de la mission Topex/Poseidon (J1 et J2 également) a une procédure de réinitialisation qui peut prendre entre 1 et 3 secondes [Chelton et al., 2001]. Pendant ce temps, le satellite aura déjà parcouru plusieurs kilomètres d'où la possibilité d'absences fréquentes de mesures sur les petites étendues d'eau ou la traversée des fleuves. Par la suite des missions comme ERS-1&2 ou ENVISAT ont été équipées de systèmes basés sur des fenêtres de réceptions élargies pour réduire les pertes d'observations liées au décrochage de l'altimètre.

Un autre inconvénient de ce système de tracking en milieu fortement hétérogène est par exemple le lissage opéré sur des mesures successives et qui ne permet pas de distinguer clairement les discontinuités du terrain.

Un cas contraire, plus rare, qui affecte les mesures altimétriques en milieu continental appelé « accrochage » peut également se présenter. Cette situation se produit lorsque l'altimètre continue de mesurer la hauteur d'une surface réfléchissante qu'il vient de survoler mais qui n'est plus située à son nadir. Le temps de trajet aller-retour de l'onde entre le satellite et la surface au

⁵ http://www.altimetry.info/html/alti/principe/waveform/land_en.html

⁶ Valeurs obtenues à partir d'abaques pour les américains et de modèles approximatifs pour les européens.

nadir et par conséquent la mesure altimétrique s'en voit faussée (surestimation de la hauteur). Concrètement, le range (r) calculé correspond toujours à la distance séparant la cible du satellite mais sous incidence oblique et non plus verticale. Le range s'accroît donc progressivement à mesure que le satellite s'éloigne décalant de fait la fenêtre d'acquisition (figure 11). Ce type d'erreur peut entraîner un écart allant jusqu'à plusieurs dizaines de mètres sur la mesure de hauteur d'eau considérée.

1.2.2.7. « Retracking » sur les surfaces hétérogènes

L'emprise au sol de l'altimètre est fréquemment hétérogène, hétérogénéité qui a des conséquences notables sur la complexité de la forme d'onde (présence de pics multiples dans le front de montée) et la précision des mesures. Ainsi, toutes les données altimétriques provenant de surfaces hétérogènes doivent être retraitées pour produire une mesure d'élévation de surface suffisamment précise. Ce « retraitement » est appelé "retracking".

Il existe 4 algorithmes de calcul sur Envisat (Ocean, ICE-1, ICE-2, et SEA-ICE) et 2 sur Jason-2 (OCEAN et ICE-1) :

- ICE-1
- SEA-ICE

Algorithmes basés sur des méthodes de seuillages

- ICE-2
- OCEAN

Algorithmes basés sur des modèles théoriques de forme d'onde

Ces différents algorithmes de calcul ont été développés pour répondre à des conditions bien spécifiques mais aucun ne l'a été pour étudier les rivières ou lacs en milieu continental hétérogène. Les analyses de données déjà réalisées notamment dans le bassin amazonien [F.Frappart, et al., 2006] ont permis de montrer que les algorithmes Ice-2 et surtout Ice-1 étaient les mieux adaptés à ce type de terrain.

Pour compléter ces différents procédés, une technique alternative a été mise au point pour traiter les formes d'ondes observées en domaine continental. Elle consiste à trier les formes d'ondes en fonction de leur aspect, et ensuite de leur appliquer un algorithme de retraitement adapté à chaque type identifié [Berry, 2000]. Cette approche, qualifiée de « système expert », utilise 11 algorithmes. Elle a été appliquée au retraitement des mesures des altimètres ERS-1&2 et T/P [Berry et al., 2005]. Cependant, il n'existe à l'heure actuelle qu'un nombre très limité d'informations concernant cette technique dont les résultats n'ont pas été validés. Cet algorithme n'est pas utilisé dans ces travaux de stage.

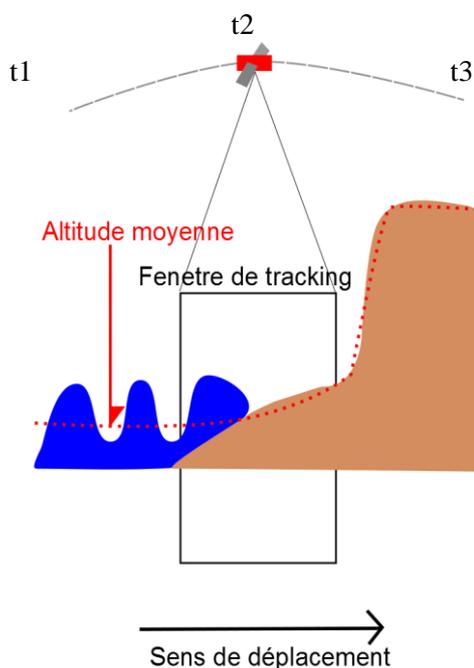


Figure 10 : illustration du phénomène d'accrochage.

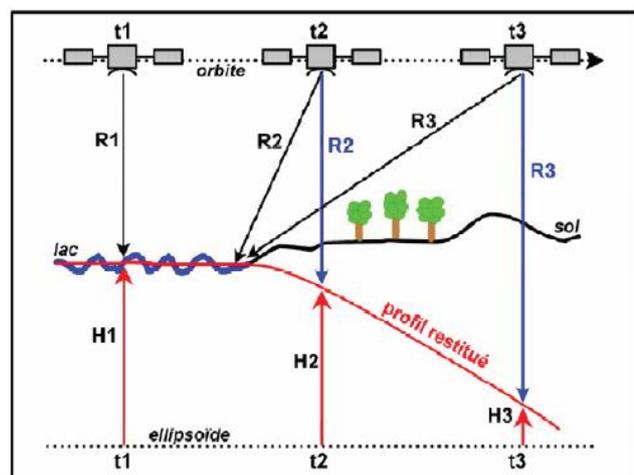


Figure 11 : illustration du phénomène d'accrochage, J. Leon

**ZONE D'ETUDE
ET
DONNEES DISPONIBLES**

2. La zone d'étude

2.1. Présentation générale

Située dans le sud ouest de la France, entre Toulouse et Auch (figure 13), notre zone d'étude d'environ 475 000 hectares est centrée sur la ville de Rieumes (43°25'02'' N, 1°06'58'' E). Elle s'intègre dans une zone plus vaste dans laquelle des missions de terrain sont continuellement réalisées (CESBIO, OMP, ONERA⁷, ESAP⁸, ENSAT⁹, UPS¹⁰...) depuis déjà de nombreuses années dans le cadre du projet « Sud Ouest », projet qui a pour objectif : « Le fonctionnement des surfaces continentales et la gestion durable des territoires en zone tempérée » (http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/sud_ouest.html).

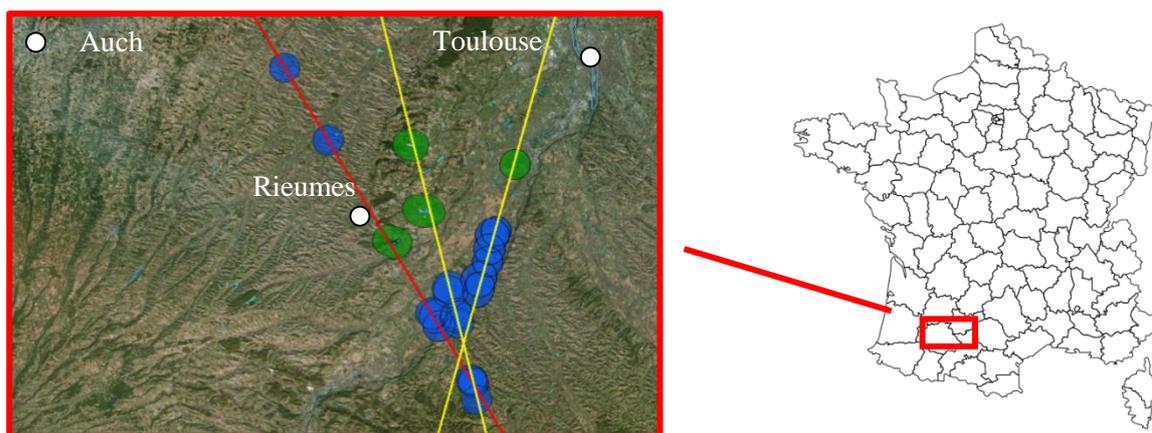


Figure 13 : Emplacement de la zone d'étude avec superposition des traces altimétriques des satellites ENVISAT (jaune) et Jason 2 (rouge) et de l'ensemble des lacs survolés (bleu) et retenus pour l'étude (vert). - image google earth.

2.2. Caractéristiques physiques

La zone d'étude a été choisie pour sa forte hétérogénéité représentative de l'ensemble de la région. Elle se trouve sous l'influence d'un régime climatique tempéré, avec un cumul de pluies important au printemps (10 jours de pluie pour un cumul minimum mensuel de 60mm) qui fait suite à un déficit observé de manière régulière en janvier. L'été, les précipitations sont faibles, moins de 50mm, et concentrées sur environ 5 jours par mois. Le cumul mensuel des pluies entre juillet et décembre reste régulier en moyenne sur les 30 dernières années, avec un cumul de 50mm par mois (figure 14).

Dominée par une agriculture intensive, cette zone est constituée en majorité de champs, forêts, lacs et petites zones urbaines. L'une des particularités de cette zone est l'utilisation très répandue de l'irrigation d'où une forte contrainte sur la disponibilité en eau et un besoin permanent de gestion des ressources d'eau que représentent les lacs.

Pour ce qui est de la topographie générale de la zone, la partie Est reste relativement plate (pente moyenne 1%) contrairement à la partie Ouest qui présente elle un relief plus marqué (pente moyenne 4,5%).

Sur cette zone, une quinzaine de lacs se situent sous les traces altimétriques. Après examen de chacun, seulement quatre, identifiés comme ayant le plus de chance de réussite ont été retenus pour réaliser cette étude. Seront donc suivis le lac de Savères (lac A), le lac de la Bure (lac B), le lac de

⁷ Office national d'études et de recherches aérospatiales

⁸ École supérieure d'agriculture de Purpan

⁹ École nationale supérieure d'agronomie de Toulouse

¹⁰ Université Paul Sabatier, Toulouse

Sainte Foy (lac C) ainsi qu'une gravière à Muret (lac D) figure 13 et annexe 5. Les critères qui ont permis cette sélection sont, dans l'ordre d'importance : l'emplacement du lac par rapport à la trace altimétrique (inférieure à 100 mètres et si possible sous la trace), le nombre de points de mesure sur la surface du lac et enfin les données déjà disponibles sur le lac.

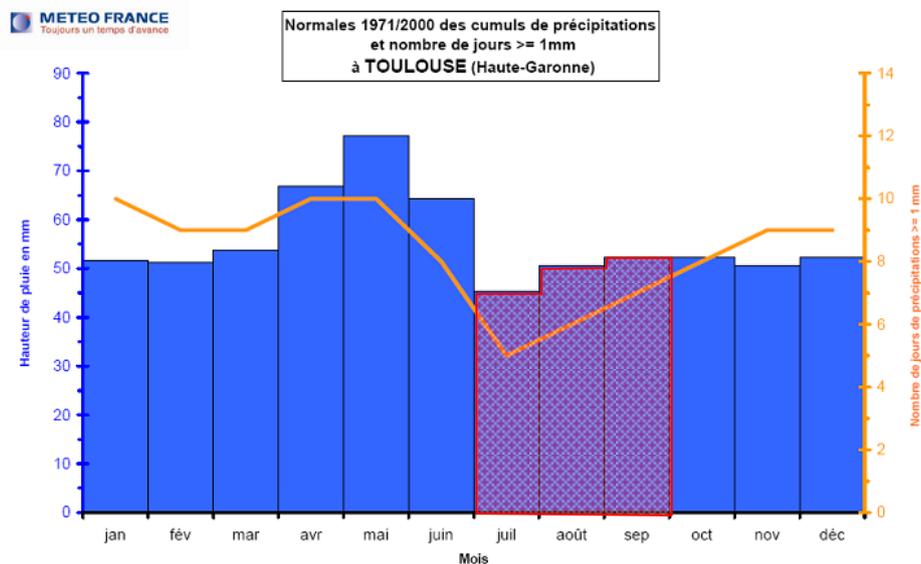


Figure 14: Moyenne des précipitations mensuelles sur la zone (1971 2000) - crédit Météo France.

En bleu, la hauteur de pluie (mm), en orange le nombre de jours de précipitations et en rouge hachuré la période d'irrigation.

3. Données disponibles pour cette étude

3.1. Données terrain

Pour cette étude, nous disposons sur trois des quatre lacs suivis (A, B, C) des abaques constructeurs (figure 15), d'un suivi régulier des hauteurs et volumes d'eau (tous les 15 jours minimum) depuis 2002 pour les lacs A et B, de données pluviométriques journalières (Météo France) ainsi que d'un relevé bathymétrique pour le lac B (agence de l'eau, annexe 8). Concernant le lac D, nous ne disposons pas de données particulières. Situé dans une ancienne gravière et proche de l'agglomération toulousaine, il n'appartient à aucun schéma d'irrigation et ne fait donc pas l'objet d'un suivi régulier contrairement aux trois lacs précédents.

L'essentiel des données terrain utilisées a été récupéré lors de réunion auxquelles j'ai pu participer avec les différents gestionnaires de ces lacs, à savoir, le SIAH du Touch (Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique de la vallée du Touch et de ses affluents), lacs A, et B et M. La Matre président de l'Association Syndicale Autorisée (ASA) des agriculteurs irriguant du lac C

Enfin, nous disposons également de toutes les données terrain recueillies lors de la campagne MCM'10 [Baup et al., 2012, IGARSS].

En complément, nous disposons également de 70 images SPOT (2-4-5) sur la période 2003-2011.

Capteurs	Nombre d'images							
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2011
SPOT-2	5	2	1	3	5	8		4
SPOT-4	6	4	4	2	1	2	5	3
SPOT-5	2	1	3		1	2	4	
TOTAL	13	7	8	5	7	12	9	9

Tableau 1 Chronogramme des acquisitions SPOT

Malheureusement, pour cause de fauché trop faible de certaines images satellites, ces données ne sont disponibles que sur trois des quatre lacs étudiés (lac A, B et C)

3.2.2. Données satellitaires de hauteur des lacs

Les données altimétriques utilisées¹¹ pour cette étude ont été téléchargées depuis le site du CTOH (Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère - <http://ctoh.legos.obs-mip.fr/>). Elles proviennent des mesures faites par les altimètres radar RA-2 et Poséidon-2 à bord des satellites Envisat (lancé en février 2002 par l'ESA) et Jason-2 (lancé en Juin 2008 coopération CNES NASA). Nous disposons de trois traces altimétriques différentes sur la zone d'étude : deux issues d'Envisat et une Jason-2 (figure 13). La mesure altimétrique se faisant uniquement au nadir du satellite et l'ouverture du faisceau d'antenne étant très faible, elle ne couvre donc qu'une petite partie (20%) de la zone d'étude¹².

Les données altimétriques sont disponibles à partir de 2002 pour Envisat (à raison de un passage tous les 35 jours) et à partir de 2008 en ce qui concerne Jason-2 (un passage tous les 11 jours).

¹¹ Données altimétriques de niveau 2 c'est-à-dire comprenant les positions (longitude, latitude) des points de mesure, le temps d'acquisition des mesures, et les différents paramètres nécessaires au calcul de la hauteur altimétrique (altitude du satellite sur son orbite, distance satellite-sol, corrections, ...)

¹² 20 % de la zone couverte (ce qui est énorme, comparé à de densité globale du maillage altimétrique) car la zone d'étude est centrée sur l'intersection de trois traces altimétriques afin de maximiser nos chances de réussite.

EXTRACTION ET PREPARATION DES DONNEES SATELLITAIRES

4. Traitement des données de surface multicapteurs

4.1. Protocole utilisé

La première étape de ce travail a été effectuée en 2012 par Mlle Sophie Flanquart dans le cadre de son stage de L3 au sein de ce même laboratoire. Ce stage a eu pour objectif premier d'extraire l'ensemble des données disponibles sur les lacs de la zone à partir des images multicapteurs acquises pendant l'année 2010. Pour ce faire, une classification Supervisée parallélépipédique sous ENVI a été réalisée afin d'isoler l'ensemble des surfaces d'eau libre de la zone.

Mon travail a consisté à affiner l'analyse des résultats du stage de Sophie F. en évaluant le potentiel des images satellites acquises à haute et basse résolution spatiale pour l'estimation de la surface en eau de deux des lacs sélectionnés (B et C).

Deux catégories de capteurs ont donc été créés regroupant :

- *Ceux ayant une résolution inférieure à 10 m que nous appellerons Capteurs Haute Résolution (CHR), à savoir (FORMOSAT, RADARSAT-2 et TERRASAR-X).*
- *Ceux ayant une résolution supérieure à 10 m que nous appellerons Capteurs Basse Résolution (CBR), à savoir (LANDSAT-5/7, SPOT 2-4-5).*

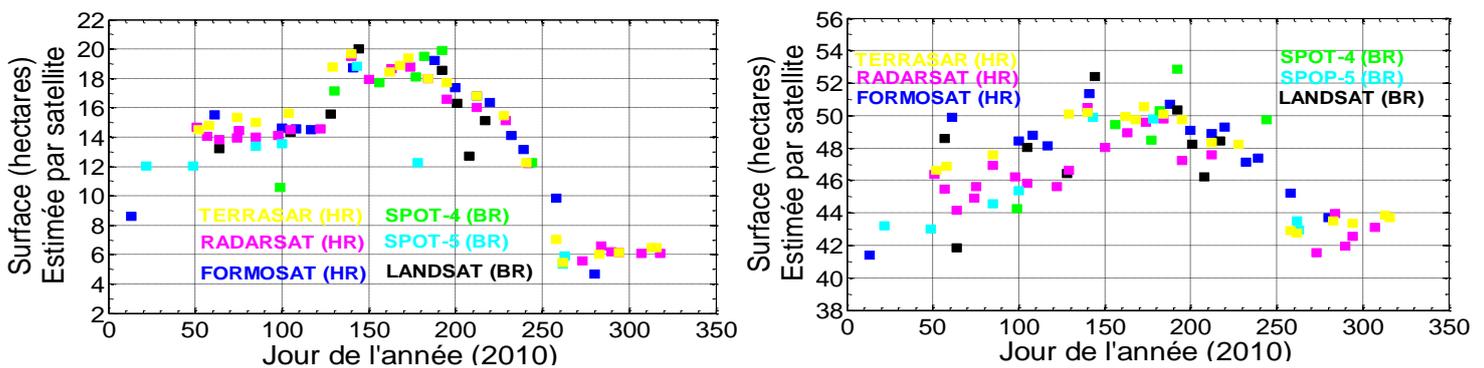


Figure 17 : Suivi des variations de surface estimée par satellite sur le lac C (figure de gauche) et du lac B (figure de droite) au cours de l'année 2010. Chaque capteur utilisé est représenté par une couleur différente.

Suite à cela, il a été entrepris de réaliser une première normalisation de ces données en utilisant comme référence le capteur ayant la plus haute résolution, à savoir sur cette campagne de mesures, TERRASAR-X (en jaune figure 17).

Malheureusement certains capteurs ne possèdent que très peu, voire aucune mesure commune¹³ (0 pour SPOT-4, 1 pour LANDSAT, 2 pour SPOT-5) avec notre capteur de référence (TERRASAR-X). Pour remédier à ce problème, la fenêtre temporelle utilisée pour la normalisation a donc été élargie à plus ou moins trois jours. Il convient cependant de garder à l'esprit que cette solution peut être une source d'erreur importante si jamais cet intervalle se centre sur un épisode de fortes précipitations (typiquement un orage dans cette région).

¹³Par mesure commune, on entend mesure prise dans une même fenêtre temporelle fixée initialement à 24h

Les résultats obtenus même une fois cette « fenêtre » élargie à plus ou moins trois jours sont assez mitigés, du fait principalement de la trop grande hétérogénéité des capteurs mais aussi de la méthode de normalisation utilisée (trop générale).

Compte tenu du grand nombre de données Haute Résolution (HR) disponible sur 2010, il a été décidé afin d'obtenir un résultat de meilleure qualité de traiter les données basse et haute résolution séparément pour ne garder par la suite que celles issues des CHR. Les périodes P1 (du jour 50 au jour 125) et P2 (du jour 270 au jour 325) considérées comme stables serviront d'échantillons pour évaluer les résultats obtenus (figure 18 et tableau 2).

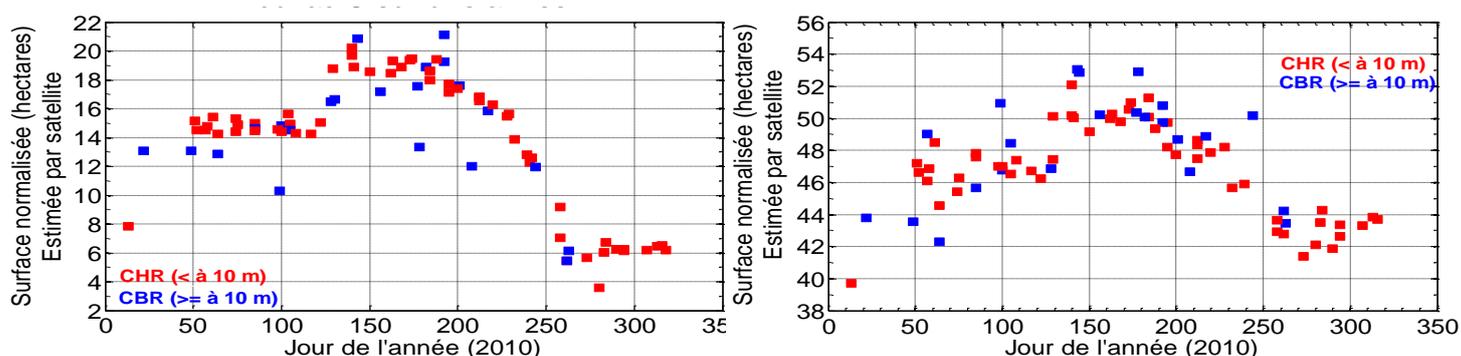


Figure 18 : idem figure 17 avec cette fois ci une classification selon les deux catégories de capteurs identifiées, à savoir CHR (rouge) et CBR (Bleu).

Au terme de ce processus, nous obtenons une précision moyenne sur les 2 lacs (écart-type par rapport à la moyenne obtenue avec TERRASAR-X) de l'ordre de 2.24 % sur P1 et 10% sur P2 avec une précision qui généralement, s'accroît proportionnellement au rapport surface / périmètre du lac considéré. Cette différenciation nous permet également de réduire considérablement le pourcentage de mesures aberrantes.

Lacs	Période 1 (P1)		Période 2 (P2)	
	RMSE (CHR et CBR)	RMSE (CHR)	RMSE (CHR et CBR)	RMSE (CHR)
La Bure (B)	1,86 ha – 4%	0,91 ha – 1,9%	1,11 ha – 2,5%	0,81 ha – 1,9%
Sainte-Foy (C)	1,0 ha – 7%	0,43 ha – 2,9%	1,64ha – 26%	1,15 ha – 18%

Tableau 2 : indicateur statistique sur les périodes P1 et P2 en fonction des données utilisées

4.2. Interprétation

La principale source de variation des valeurs de surface provient de la prédominance de pixels mixtes (mixels) sur les contours des lacs qui entraîne donc des approximations dans la classification. Cette erreur est d'autant plus importante que la taille du pixel de l'image est élevée. Ainsi pour un pixel d'environ 20 m de coté (SPOT-4), la variation de surface peut ainsi atteindre 4 hectares pour le lac C par exemple, soit 20% de la surface totale maximum pour les images dites à basse résolution (CBR). Les images mieux résolues (CHR, avec un pixel au sol d'environ 2,5 m de coté, TERRASAR-X) offrent de plus faibles incertitudes (0.5 hectares soit 2.5% de la surface totale maximum).

Concernant le lac A ne disposant pas d'image issue de TERRASAR-X ce travail n'a pu être effectué, toutefois une séparation selon le type de capteurs CHR, CBR a tout de même été réalisée afin de ne garder pour la suite de cette étude que des images « haute résolution ».

5. Extraction de données altimétriques

Les données altimétriques de niveau 2 sont traitées avec le logiciel VALS (Virtual ALtimetry Station.). Ce programme a été initialement développé pour le calcul de séries temporelles de niveau d'eau sur les fleuves, lacs et plaines d'inondation [Santos da Silva et al., 2010]. La partie qui va suivre sera donc l'occasion d'élargir le champ d'application de cet outil à de petites surfaces d'eau en milieu continental fortement hétérogène.

Les étapes de traitement des données altimétriques sont résumées dans la figure ci-dessous. Pour plus d'informations concernant l'utilisation à proprement dit de VALS se référer au manuel d'utilisation disponible en ligne:

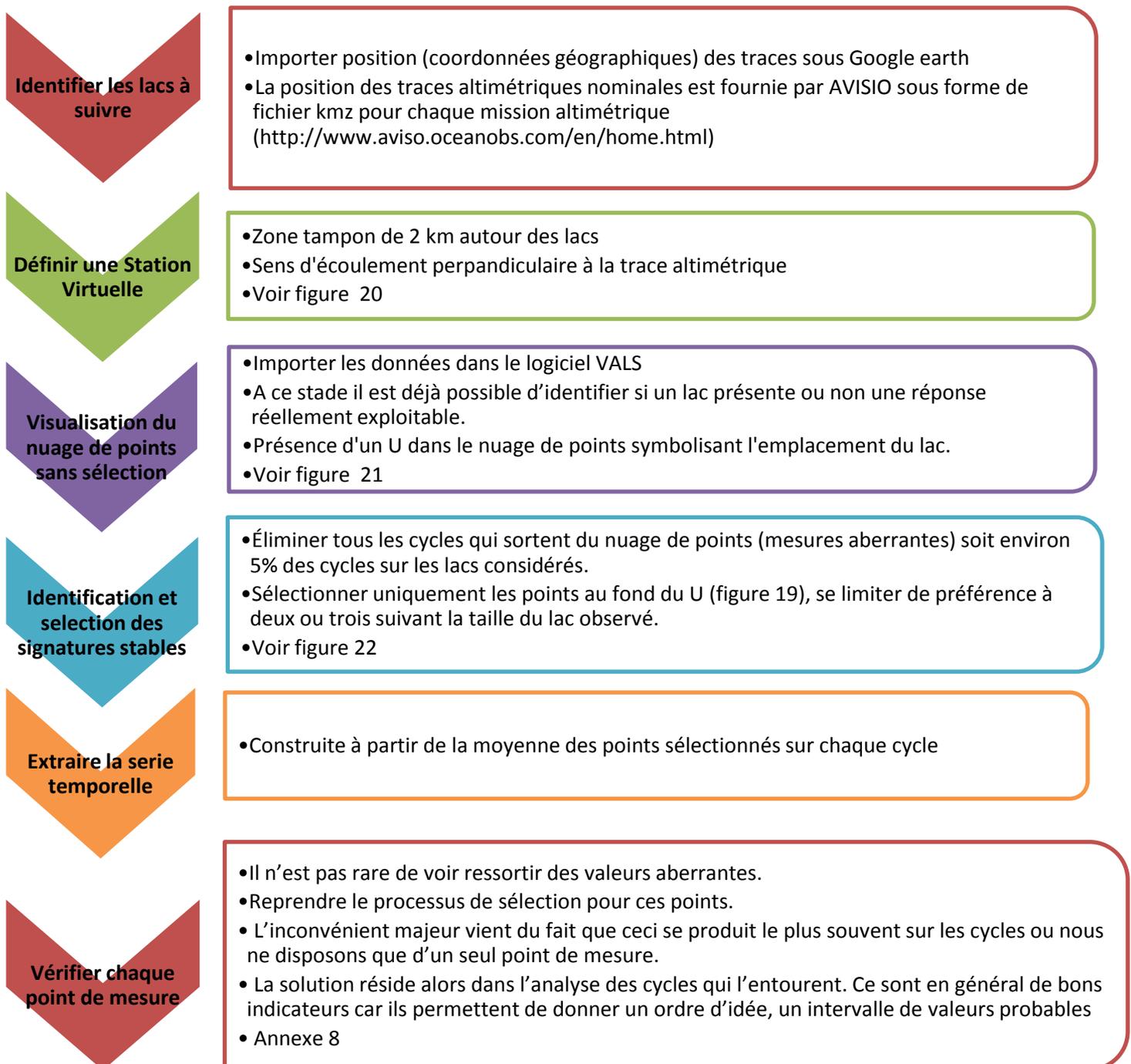


Figure 19 : Processus de traitement des données altimétriques



Figure 20 : exemple de station virtuelle sur le lac de la Bure. La trace théorique de l'altimètre est représentée en trait plein jaune, alors que les points nadirs réels sont notés par des carrés rouges et blancs.

Définir une station virtuelle couvrant une large zone a pour objectif principal de récupérer un nombre de points important à chaque passage de l'altimètre, et ainsi d'avoir plusieurs points avant, sur (si possible) et après le lac survolé

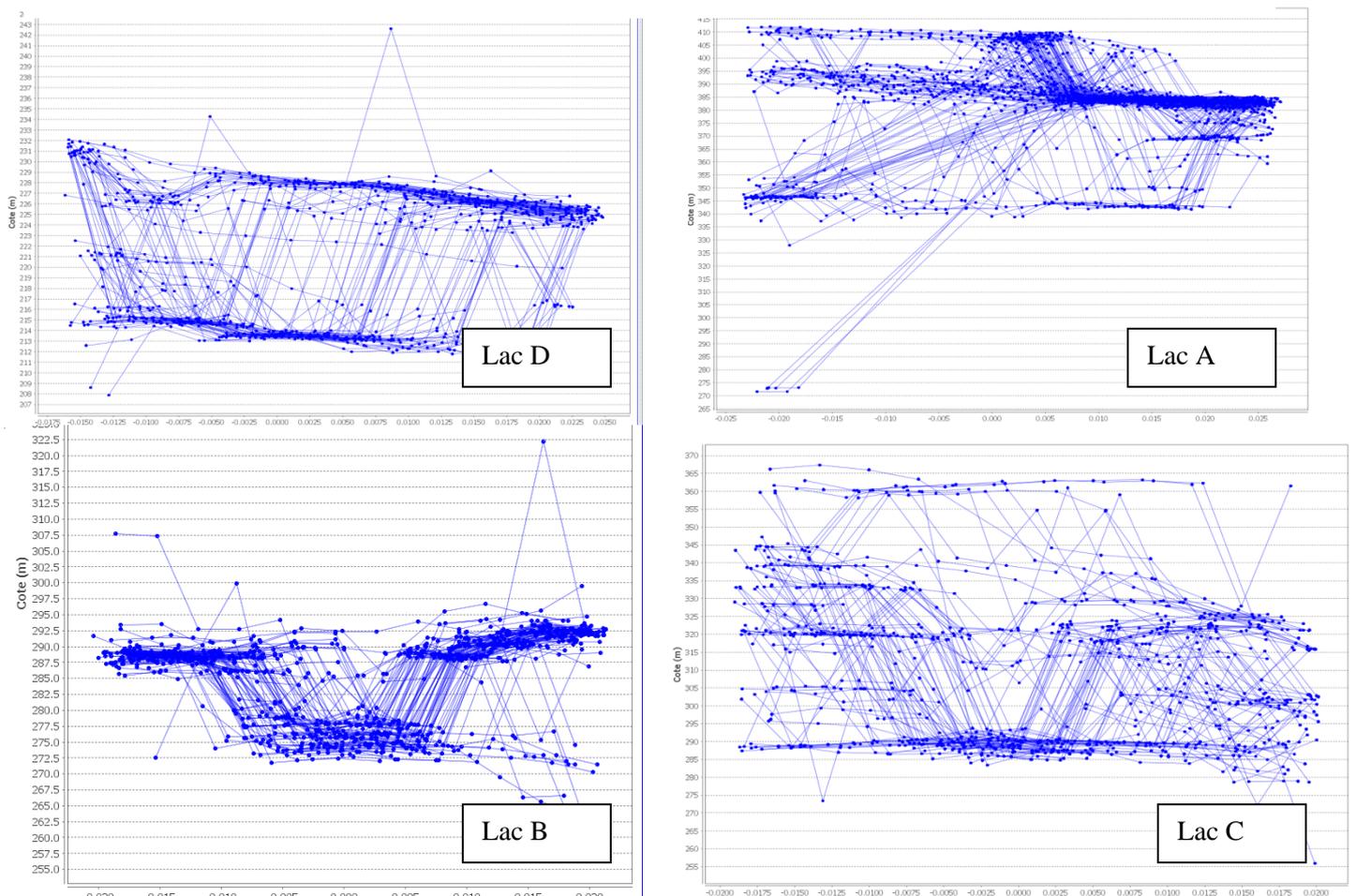


Figure 21 : nuages de point brutes correspondant aux 4 lacs.

Deux cas se présentent alors :

- D'un côté les lacs comme Savères et Muret (B et C) qui ne présentent aucune forme reconnaissable que l'on pourrait associer à l'emplacement du lac.
- Et, à l'opposé les lacs comme Sainte-Foy et La Bure (A et D) qui eux, proposent des nuages de point dominés par la présence d'un « U » plus ou moins visible, symbolisant l'emplacement des lacs dans le signal altimétrique.

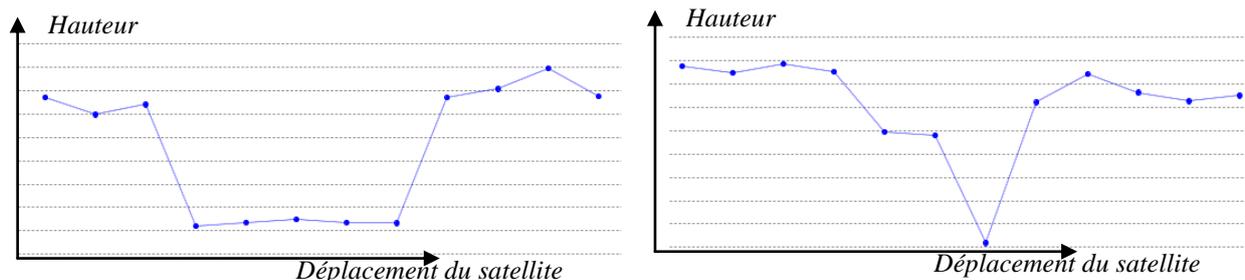


Figure 22 : Coupe Altimétrique au niveau des lacs observés avec présence d'un U plus ou moins marqué au niveau du lac

Sur les lacs sélectionnés pour l'étude, seulement deux ont montré des résultats intéressants et ont permis l'élaboration d'un protocole de sélection. De plus, il a été possible, comme le montre le tableau suivant, de garder un grand nombre de mesures (67-77%) nécessaires au suivi « fin » de l'évolution saisonnière de la hauteur des lacs.

Lac	Période 2002-2011		Année 2010 (référence)	
La Bure	67/86 (mesures)	77%	9/9 (mesures)	100%
Sainte-Foy	57/85 (mesures)	67%	9/9 (mesures)	100%
Savères	0/ (mesures)	0%	0/ (mesures)	0%
Muret	0/ (mesures)	0%	0/ (mesures)	0%

Tableau 3 : Récapitulatif du nombre de mesures utilisables à la fin du protocole sur les 4 lacs

Le point positif de cette première approche est qu'il est bel est bien possible avec les techniques actuelles d'obtenir une mesure altimétrique de ces petites surfaces d'eau. L'inconvénient majeur est cependant qu'à l'heure actuelle, il n'est pas possible de généraliser cet outil à toute une zone du fait de la technologie employée.

En ce qui concerne, le nombre de mesures altimétriques (très faible) dû à la période de revisite du satellite, le but est à ce stade d'en garder un maximum. D'où l'importance de disposer de plusieurs types de données (surface enregistrée par CHR, pluviométrie de la zone, volume réel du lac) afin d'identifier plus finement l'amplitude des variations et donc d'estimer la valeur probable de la mesure altimétrique et ainsi éliminer uniquement les mesures qui semblent aberrantes au vu des autres données.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette partie a pour objectif de présenter l'ensemble des résultats obtenus. Afin d'en faciliter la compréhension celle-ci se décompose de la façon suivante :

- ***Validation des mesures altimétriques***

L'objectif est ici de réaliser un premier constat quand au potentiel des mesures altimétriques dont nous disposons.

- ***Étude annuelle - Estimation du volume des lacs en 2010 : approche altimétrique et SAR Haute Résolution.***

L'objectif est ici d'évaluer s'il est possible, à partir de données satellitaires, de suivre les grandes variations qui se produisent au cours d'un cycle annuel, puis si tel est le cas, avec quelle précision.

- ***Étude pluriannuelle – Estimation des volumes du lac de la Bure entre 2003 et 2011. Approche altimétrique.***

L'objectif est ici d'évaluer la capacité des mesures altimétriques à retranscrire le cycle annuel des plans d'eau mais aussi les événements marquants tels qu'une sécheresse (typiquement 2003) ou bien un printemps particulièrement riche en précipitations (2005).

6. Validation des mesures altimétriques

Il n'existe pour le moment aucune étude concernant la précision de la réponse altimétrique sur de très petites masses d'eau continentales (< 100 hectares). Disposant dans le cadre de cette étude de mesures de hauteur d'eau altimétriques et terrain acquises simultanément sur une période d'un peu moins de 10 ans (2003-2011), nous allons pouvoir évaluer cette précision (figure 23)

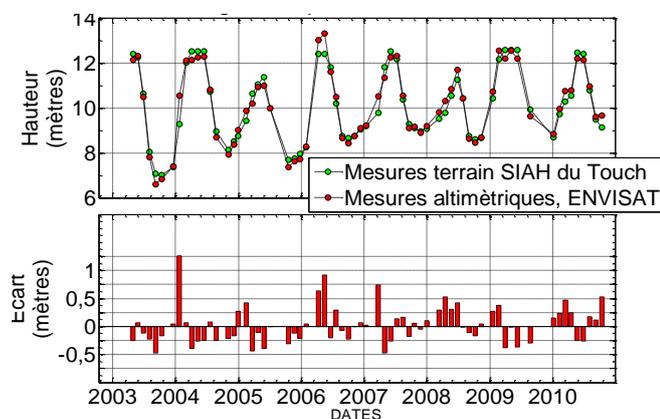


Figure 23 Comparaisons entre hauteurs altimétriques et hauteurs terrain, lac B

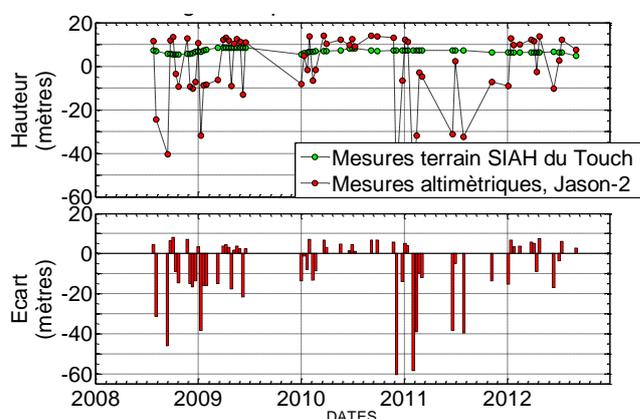


Figure 24 Comparaisons entre hauteurs altimétriques et hauteurs terrain, lac A

Lac de la Bure	
Précision (mètres)	Pourcentage de mesures associées
0,1	22%
0,25	58%
0,35	75%
0,5	91%
0,75	97%
1,3	100%

Tableau 4 : Indication sur les écart mesurés entre les deux jeux de données testés figure 24

Lac de Savères	
Précision (mètres)	Pourcentage de mesures associées
0,5	0%
2,5	8%
5	33%
10	62%
20	85%
40	95%

Tableau 5 : Indication sur les écart mesurés entre les deux jeux de données testés figure 25

Comme l'on pouvait s'y attendre au vu des sélections effectuées partie 5, les résultats sont assez partagés. D'un côté l'altimètre Ra-2 d'Envisat figure 23 montre des résultats assez exceptionnels puisqu'à en croire le tableau 3 on obtiendrait une précision sur les hauteurs mesurées de l'ordre de 30 cm dans près de 70 % des cas. Précision qui certes est encore loin des deux centimètres annoncé en introduction sur les océans mais qui s'apparente à celle obtenue depuis quelques années sur les grands fleuves telle que l'Amazone ou le Nil.

À l'opposé, les résultats de la figure 24 issus des mesures de l'altimètre embarqué sur Jason-2 sont incohérents, avec des écarts par rapport aux mesures terrain pouvant atteindre plusieurs mètres.

Suite à ce constat, il est cependant possible d'affirmer que **la technique de l'altimétrie satellitaire jusqu'ici réservée aux masses d'eau de très grande superficie peut également s'appliquer à des masses d'eau d'une superficie inférieure à 100 hectares respectant certaines conditions.**

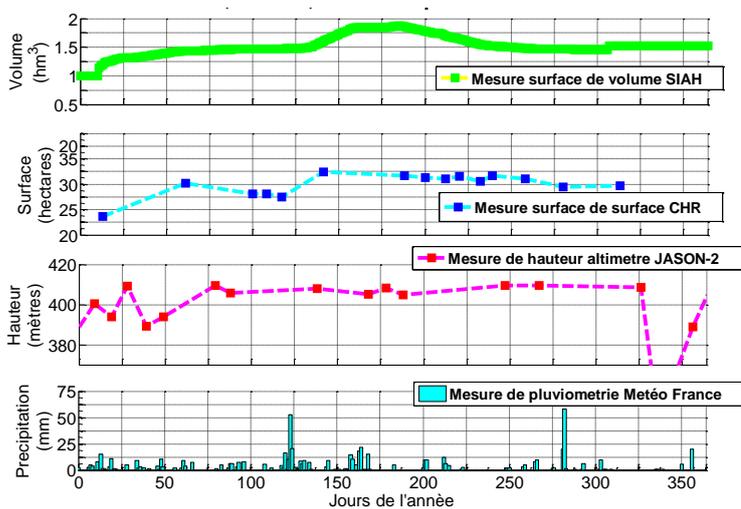
Tout l'enjeu des tests qui vont suivre sera de confirmer ces résultats en confrontant ces mesures altimétriques aux autres données disponibles (images haute résolution, données terrain).

7. Étude annuelle - Estimation du volume des lacs en 2010 : approche altimétrique et SAR HR.

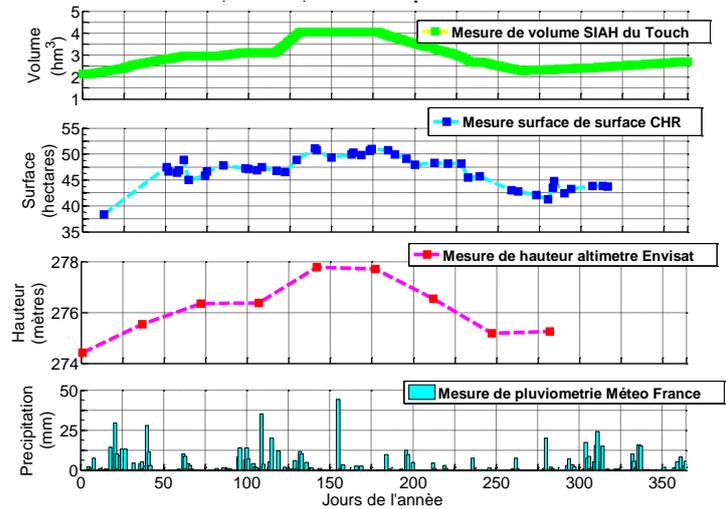
7.1. Comparaison et analyse du cycle annuel (2010)

Les graphiques figurés ci-dessous (figure 25), représentent l'évolution de l'ensemble des données disponibles au cours de l'année 2010 sur les lacs A, B et C avec en bleu les variations de surface (données CHR), en rouge les variations de hauteur (données altimétriques) et en vert les variations de volume (données terrain). La hauteur des précipitations journalières est représentée sous forme d'histogramme.

Il apparait alors au vu de ces graphiques, que les mesures enregistrées par les différents types de capteurs (satellitaires et terrestres) semblent (hormis les mesures altimétriques du lac A) se superposer et traduire une seule et même évolution, à savoir la variation du stock d'eau des lacs au cours de l'année.



Lac A



Lac B



Lac C

Figure 25 : Évolution temporelle de l'ensemble des données disponible sur chacun des 3 lacs (A,B et C)

En vert : Mesure de volume terrain SIAH du touch)

En bleu : Mesure satellitaire de surface (CHR)

En rouge : Mesure satellitaire de hauteur (Altimetres)

Sous forme d'histogramme : Les précipitations journalières (Météo France)

De plus, les phases caractéristiques (remplissage et vidange) du cycle annuel d'un lac en zone agricole irriguée sont clairement identifiables sur les données satellitaires (exemple sur la lac B en annexe 7). L'apport de données terrain notamment pluviométriques permet de confirmer précisément les dates de ces différentes phases qui peuvent varier d'un lac à l'autre.

7.2. Relation entre surfaces et hauteurs satellitaires

Étant donnée l'apparente superposition des deux séries de données (Surface SAR HR et Hauteur altimétrique), il est raisonnable d'envisager une relation faisant le lien entre celles-ci. Dans l'idéal, il serait préférable de n'utiliser que des données acquises à un même instant pour établir cette relation. Cependant ne disposant pas de telles mesures, il a été décidé, au vu des données disponibles de procéder à un ensemble de trois tests (T1, T2, T3) utilisant un intervalle de temps entre mesures associées variable afin de :

- *Garder un nombre de mesures maximum et ainsi valider la relation trouvée.*
- *Mettre en évidence l'impact du décalage temporel sur la qualité des résultats.*
- *Montrer également la stabilité des résultats obtenus avec des jeux de données pourtant différents*

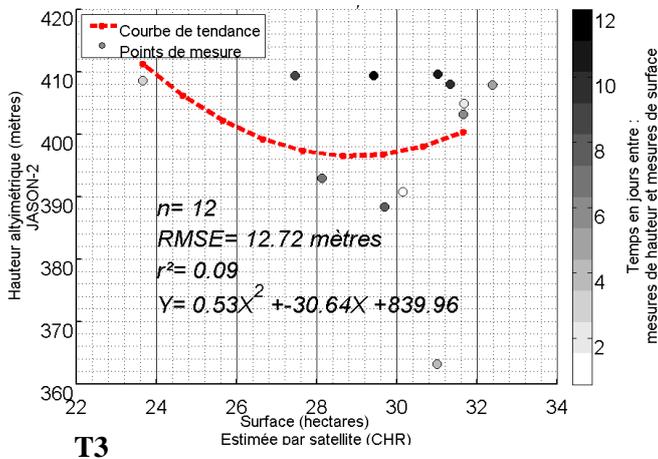
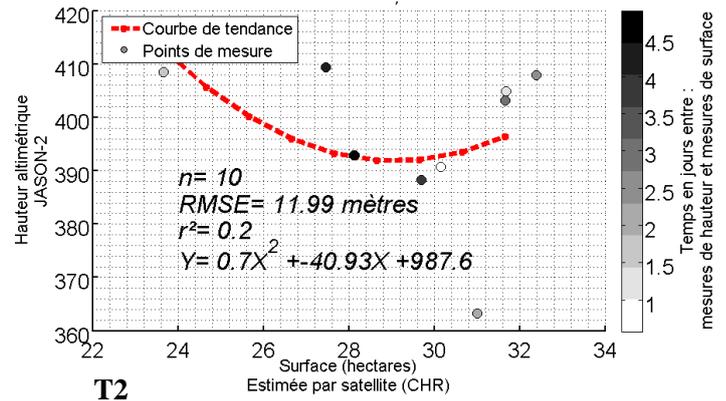
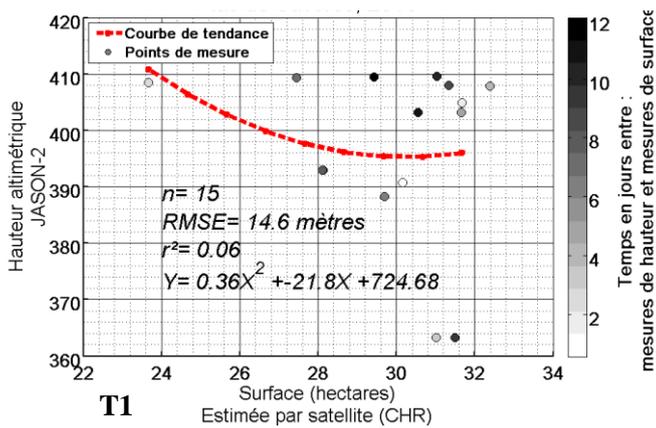


Figure 26 : Résultats des trois tests réalisés sur le lac A

T1 : associe chaque mesure de surface (CHR) à la mesure de hauteur (altimétrique) la plus proche temporellement.

T2 idem à T1 avec une limite de temps entre les mesures fixée à 5 jours

T3 associe chaque mesure de hauteur (altimétrique) à sa mesure de hauteur la plus proche

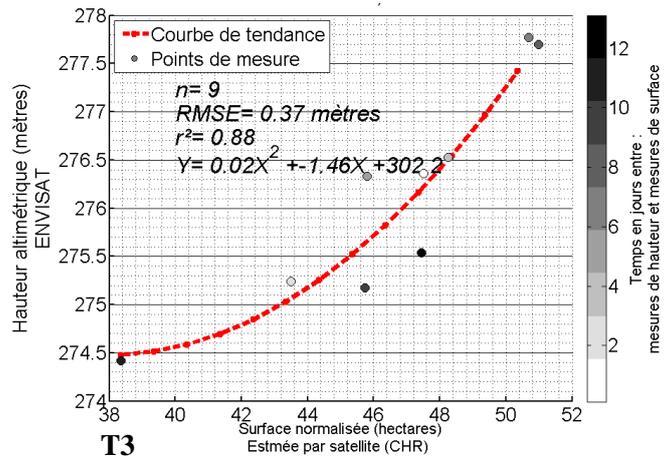
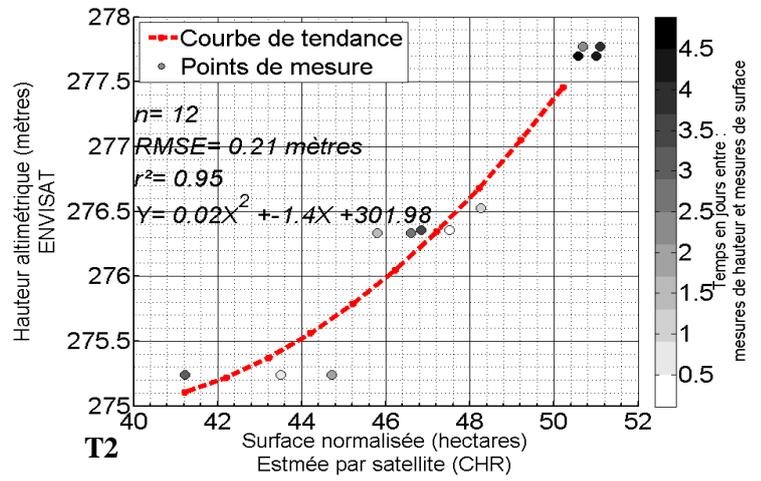
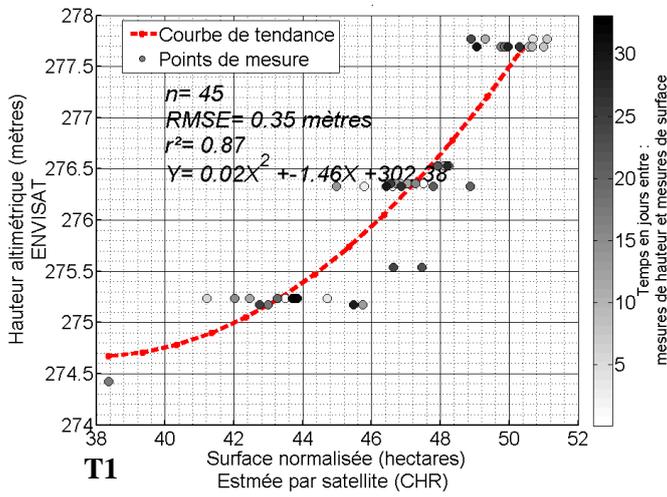


Figure 27 : Résultats des trois tests réalisés sur le lac B

T1 : associe chaque mesure de surface (CHR) à la mesure de hauteur (altimétrique) la plus proche temporellement.

T2 idem à T1 avec une limite de temps entre les mesures fixée à 5 jours

T3 associe chaque mesure de hauteur (altimétrique) à sa mesure de hauteur la plus proche

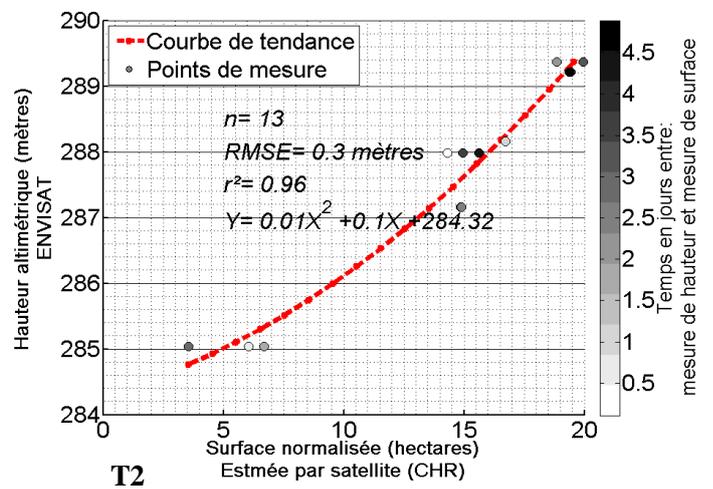
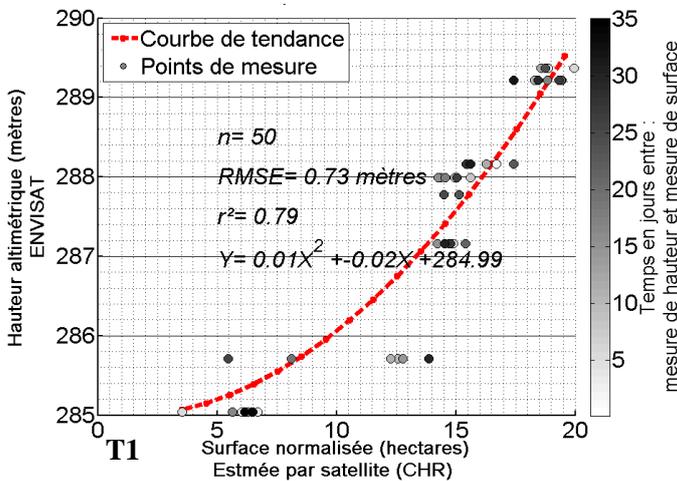
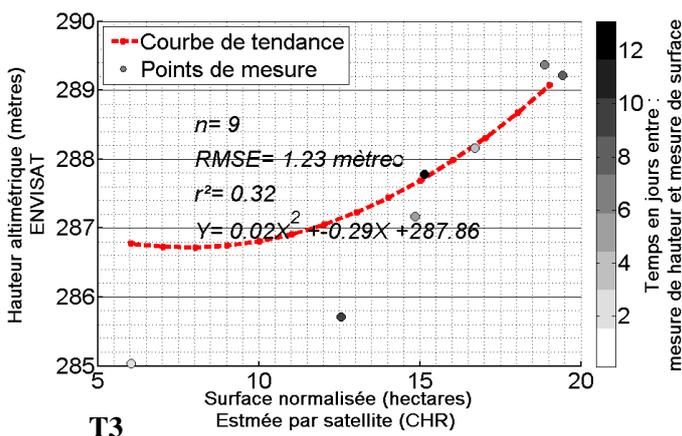


Figure 28 : Résultats des trois tests réalisés sur le lac C

T1 : associe chaque mesure de surface (CHR) à la mesure de hauteur (altimétrique) la plus proche temporellement.

T2 idem à T1 avec une limite de temps entre les mesures fixée à 5 jours

T3 associe chaque mesure de hauteur (altimétrique) à sa mesure de hauteur la plus proche



Au vu de ces résultats, on s'aperçoit qu'une relation entre surface et hauteur existe bien, hormis pour la lac A, ce qui était prévisible au regard de la figure 24. Les tests concernant les mesures altimétriques sur ce lac seront donc abandonnés dans la suite de cette étude pour se concentrer uniquement sur les lacs B et C.

Sur les lacs de la Bure (B) et Sainte-Foy (C), le test T2 est celui qui modélise au mieux le lien Hauteur-Surface (tableau 6).

Lac	RMSE (en mètre)	RMSE (en % par rapport à la variation total)	r ²
La Bure (T1)	0,35	11	0,87
La Bure (T2)	0,21	6,5	0,96
La Bure (T3)	0,37	11	0,88
Sainte Foy (T1)	0,73	16	0,79
Sainte Foy (T2)	0,3	6	0,96
Sainte Foy (T3)	1,23	27	0,32

Tableau 6 : indicateurs statistiques des relations Surface Hauteur (satellites) des lacs B et C

L'ensemble des tests réalisés conduit à des relations (polygone d'ordre deux) très similaires ce qui renforce la pertinence des résultats obtenus sur le test T2. Ainsi le fait d'introduire des données de moins bonne qualité (T1) ou d'utiliser un nombre très restreint de données (T3) n'affecte guère les résultats obtenus.

Toutefois, cette batterie de tests permet de mettre en évidence l'importance de disposer de données acquises quasi simultanément afin d'obtenir la meilleure précision possible.

L'analyse de la relation qui associe altimétrie radar et imagerie SAR HR amène une information supplémentaire quant à la façon de se remplir des lacs observés. En effet, on remarque que le remplissage de ces lacs se traduit dans un premier temps essentiellement par une augmentation de la surface (phase verte), puis seulement dans un deuxième temps la tendance s'inverse (phase jaune) pour au final, jouer essentiellement sur la variation de hauteur (phase rouge). On peut alors définir schématiquement la forme générale de ces lacs (figure 29). Forme qui a été confirmée par l'analyse des données bathymétriques pour le lac de la Bure (annexe 8).

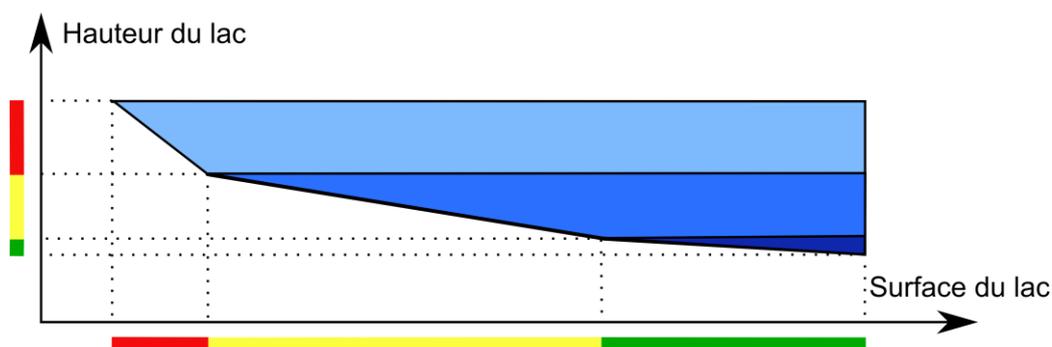


Figure 29 : Forme générale des retenues d'eau observées, déduite des rapports entre variation de surface et variation de hauteur.

7.3. Relation entre données satellitaires et données terrain

Il s'agit ici de comparer les données spatiales aux données terrain que représentent les mesures de volume. Sur le même principe que la comparaison entre hauteur et surface, vont être mises en relation d'une part les données de surface et de volume puis dans un second temps les données de hauteur et de volume pour chacun des 3 lacs en fonction des données disponibles.

7.3.1. SAR / VOLUME

Compte tenu du grand nombre de données surface disponibles (environ une mesure de surface par semaine) et des mesures de volume qui sont elles quasi-journalières, l'intérêt de tester plusieurs fenêtres de temps ne se justifie pas. Ainsi seules les mesures prises le même jour seront associées pour garantir un maximum de précision.

Le but est ici, de trouver la relation qui lie le volume du lac (mesures terrain) aux données de surface issues des CHR. Si cette relation est jugée fiable, il sera possible d'obtenir une estimation régulière du volume d'eau stocké dans le lac, en fonction des acquisitions satellitaires disponibles.

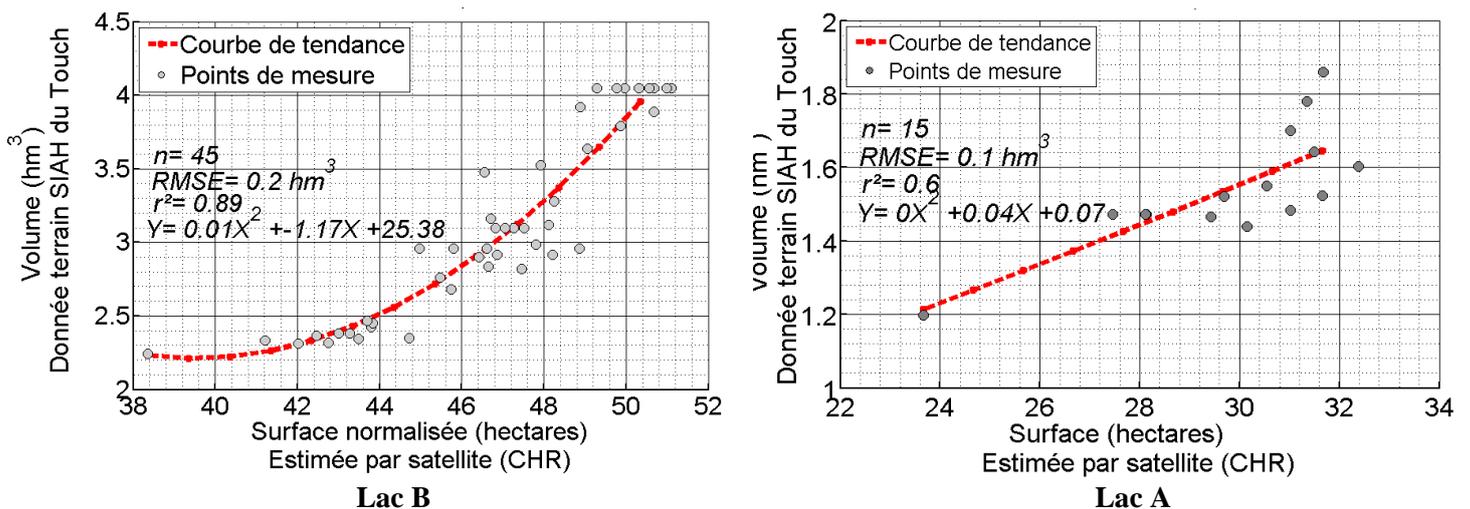


Figure 30 : Comparaison des données de surface (satellitaires) et de volume (terrain) sur les lac A et B.

A partir des différents résultats présentés figure 30, on s'aperçoit qu'il existe bien une relation entre les données satellitaires, représentées ici par les mesures de surface, et les données terrain que sont les mesures de volume. Ce lien est toutefois moins fort que celui observé précédemment entre les deux jeux de données satellitaires, si l'on en croit les résultats obtenus (tableau 7). Toutefois cela confirme le fait que **l'imagerie SAR est elle aussi utilisable pour le suivi de masse d'eau de petite taille en milieu fortement hétérogène.**

Lac	RMSE (en m^3)	RMSE (en % par rapport au volume total moyen)	r^2	Nombre de Mesures CHR
Savères (A)	100 000	15	0,6	15
La Bure (B)	200 000	10	0,89	45

Tableau 7 : indicateurs statistiques des relations Surface Volume sur les lacs A et B

La comparaison des résultats obtenus sur ces deux lacs permet également de mettre en évidence l'importance des données satellitaires utilisées. Ces deux lacs sont en effet gérés par la même structure (SIAH du Touch) et disposent donc de mesures de volume équivalentes. Pour ce qui est des données de surface, elles proviennent pour le lac B de 3 satellites différents, Terrasar-X, Radarsat-2 et Formosat (classés par ordre de résolution décroissante) et ont pu faire l'objet d'un post traitement (cf. partie 4). Pour le lac A, distant de seulement 6 km, seules les données Formosat sont disponibles. Les conséquences sont immédiates, d'une part les mesures sont en nombre insuffisant pour retranscrire avec finesse le remplissage complet du lac (figure 30) et la précision globale s'en voit dégradée (tableau 7).

Pour compléter cette partie concernant les données de surface et la nécessité d'en disposer en quantité et qualité suffisante, un dernier test a été réalisé. Celui-ci porte sur la différenciation entre CHR et CBR. Le but est ici de voir si cette différenciation réalisée en partie 4 apporte réellement un plus ou si au contraire elle ne fait que diminuer le nombre de mesures utilisables (figure 30).

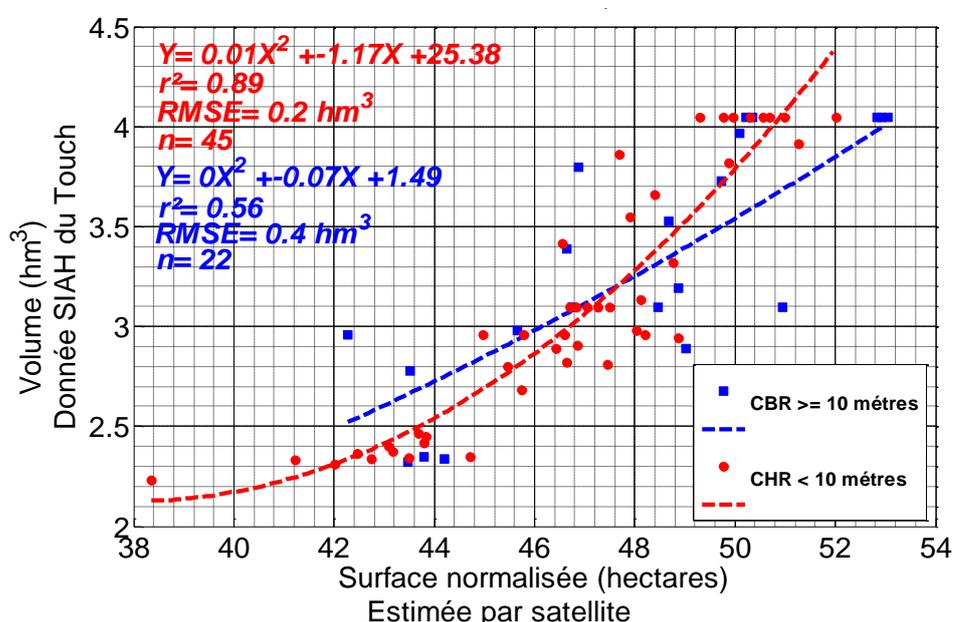


Figure 31 : Comparaison des relations surface volume obtenues sur le lac B en fonction de la résolution des données de surface utilisées - rouge CHR et bleu CBR.

Lac	RMSE (en hectares)	RMSE (en % par rapport à la surface total moyenne)	r ²
La Bure CBR	400 000	20	0,56
La Bure CHR	200 000	10	0,89

Tableau 8 indicateurs statistiques des relations Surface Volume sur sur le lac B en fonction du type de données utilisées

Et en effet au vu des résultats (figure 31 tableau 8), la différenciation réalisée partie 4.1 se justifie pleinement ici, puisqu'elle permet de réduire très nettement la dispersion des mesures autour de la courbe de tendance estimée.

L'utilisation de données satellitaires Haute Résolution devient donc un critère à satisfaire pour le suivi des masses d'eau de petite taille en milieux fortement hétérogène.

7.3.2. ALTIMETRE / VOLUME

Comme avec les données SAR, le but est ici, de trouver la relation qui lie le volume du lac aux données altimétriques. Si cette relation est jugée fiable, il sera possible d'obtenir une estimation à intervalles de temps réguliers du volume d'eau stocké dans le lac, en fonction des acquisitions satellitaires disponibles.

Grace aux données de volume quasi journalières il est ici possible d'associer chaque mesure altimétriques à son volume terrain correspondant. Toutefois, pour mettre une fois encore en avant l'importance de disposer de mesures synchrones un test associant chaque mesure de volume à sa mesure altimétrique la plus proche dans le temps sera aussi réalisé, conduisant parfois à réaliser des associations de mesures prises à près d'un mois d'intervalle et donc très probablement incohérentes.

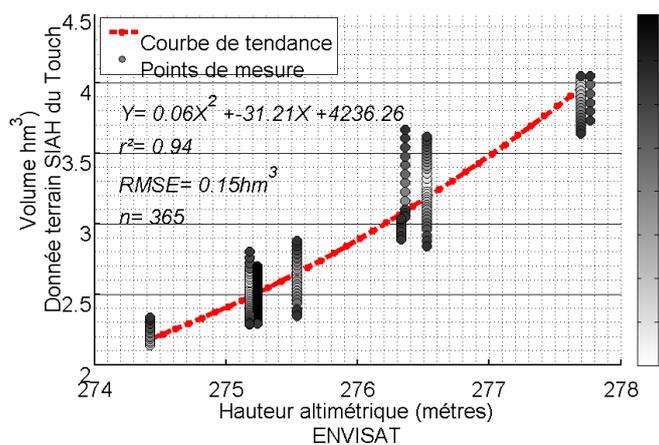


Figure 32a)

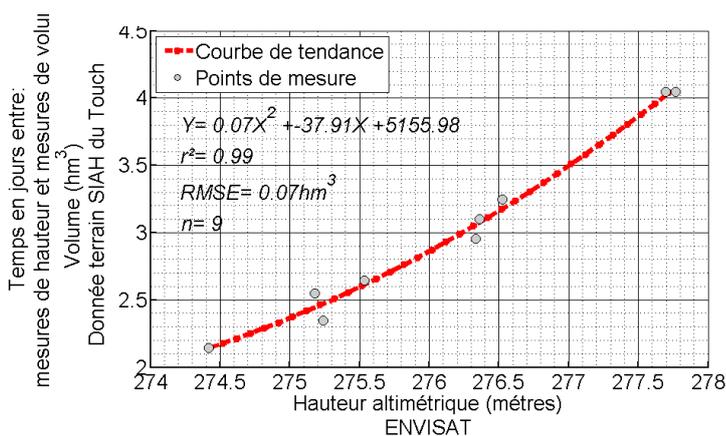


Figure 32b)

Figure 32 : Comparaison des données de hauteur (satellitaires) et de volume (terrain) sur le lac B avec en figure 32 a) l'impact de l'intervalle de temps entre les mesures associées et en figure 32 b) la relation obtenue avec des données prises le même jour.

Ainsi, la figure 32.a) permet, grâce à l'échelle de temps associée de visualiser l'effet de l'écart temporel entre les mesures sur la précision de celles-ci. En effet, on remarque, que globalement les points apparaissent de plus en plus sombres à mesure que l'on s'éloigne de la courbe dessinée, ce qui se traduit au niveau des données par :

Plus l'intervalle de temps entre l'enregistrement des mesures altimétriques et les mesures de volume est élevé, moins bonne est la précision.

D'où l'importance de réduire au maximum cet intervalle, et ainsi limiter la dispersion des couples de mesures (figure 32 b)).

Cependant la relation obtenue, même en introduisant volontairement des erreurs (du bruit) en demeure tout de même remarquable puisque quasi identique à celle ne tenant compte que des mesures synchrones. Une fois de plus ce genre de résultat renforce la confiance que l'on peut avoir dans la relation établie et nous permet de la valider même si celle-ci n'a été déterminée qu'à partir de neuf couples de données.

La relation entre la hauteur d'eau mesurée et le volume d'eau associée est donc quasi linéaire et se caractérise par des indicateurs statistiques extrêmement forts, bien plus que ceux obtenus lors des comparaisons précédentes entre données de surface et données de volume (tableau 9).

Lac	RMSE (en m ³)	RMSE (en % par rapport au volume total moyen)	r ²
La Bure (données journalières)	150 000	7,5	0,94
La Bure (données synchrones)	70 000	3,5	0,99

Tableau 9 : Indicateurs statistiques des relations Hauteur Volume sur sur le lac B en fonction du type de données utilisées

Sur ce type de lac (petite taille en zone continentale hétérogène), l'altimétrie radar quand elle fournie un signal exploitable semble donc être plus précise que l'imagerie SAR HR.

7.4. Estimation des volumes

Disposant désormais de données sur la surface, mais également sur la hauteur des lacs, il est possible d'envisager un suivi des variations de volume et donc de la ressource disponible. Deux approches sont alors possibles :

- *Utiliser uniquement les données satellitaires dont nous disposons afin de mettre en place une estimation applicable à n'importe quel lac même inaccessible et ne disposant pas de données spécifiques (abaques, levés bathymétriques), sous réserve de données exploitables.*
- *Utiliser des mesures satellitaires et terrain afin de proposer un suivi régulier à distance des lacs disposant déjà de certaines informations*

7.4.1. Variation de volume estimée à partir de données satellitaires uniquement

Grace aux mesures satellitaires précédemment validées partie 7.3.1 et 7.3.2, il est en théorie possible de calculer des variations de volume entre une date 1 et une date 2. Pour vérifier cette hypothèse, la forme des lacs observés sera assimilée à une forme géométrique simple (figure 33).

Afin d'obtenir une estimation la plus juste possible, seules les données enregistrées à moins de 5 jours d'intervalle seront ici considérées. Le tableau suivant (tableau 10) récapitule l'ensemble des données ainsi que la méthode de calcul utilisée.

Tableau 10 : Estimation des variations de volume à partir des données satellitaires sur le lac de la Bure et le lac d Sainte Foy

Jours de la mesure de surface	Ecart en jours entre les mesures associées	Surface (ha)	Δ Surface (ha)	Hauteur (mètres)	Δ Hauteur (mètres)	Volume terrain (hm ³)	Δ Volume terrain (hm ³)	Δ Volume estimé (hm ³)	Ecart entre Δ volume estimé et Δ volume réel (dm ³)	Δ Volume terrain cumulé (hm ³)	Δ Volume estimé cumulé (hm ³)	
Lac de la Bure												
74	1,109183	45,7926374		276,3335		2,76						
105	2,890777	46,8310013	1,04	276,359	0,03	2,85	0,09	0,01	78,1905	0,09	0,01	
140	2,890789	51,0988431	4,27	277,769	1,41	3,49	0,64	0,69	50,4054	0,73	0,70	
173	4,890781	50,566656	-0,53	277,696	-0,07	3,49	0	-0,04	37,8849	0,73	0,66	
212	0,890803	48,2530023	-2,31	276,527667	-1,17	3,00	-0,49	-0,63	141,3339	0,24	0,03	
280	2,890721	41,2159334	-7,04	275,2385	-1,29	2,34	-0,659	-0,76	99,1409	-0,419	-0,73	
									moyenne	81,3911		
Lac de Sainte-Foy												
74	1,109183	14,8549592		287,163								
105	2,890777	14,3192271	-0,54	287,987667	0,82	D.I.	D.I.	0,12	D.I.	D.I.	0,12	
140	2,890789	18,8685615	4,55	289,371	1,38	D.I.	D.I.	0,23	D.I.	D.I.	0,35	
173	4,890781	19,4405484	0,57	289,218	-0,15	D.I.	D.I.	-0,03	D.I.	D.I.	0,32	
212	0,890803	16,7090031	-2,73	288,164	-1,05	D.I.	D.I.	-0,25	D.I.	D.I.	0,07	
280	2,890721	6,0379	-10,67	285,0375	-3,13	D.I.	D.I.	-1,02	D.I.	D.I.	-0,95	

D.I. = Donnée Indisponible

Les variations de volume sur le lac de la Bure et Sainte-Foy ont été calculées de la façon suivante :

- Lorsque la variation est positive :
 $\Delta V = \text{Surface de référence} * \Delta H + (\Delta H * \Delta S) / 2$
- Lorsque la variation est négative :
 $\Delta V = -((\text{Surface de référence} - \Delta S) * \Delta H + (\Delta H * \Delta S) / 2)$

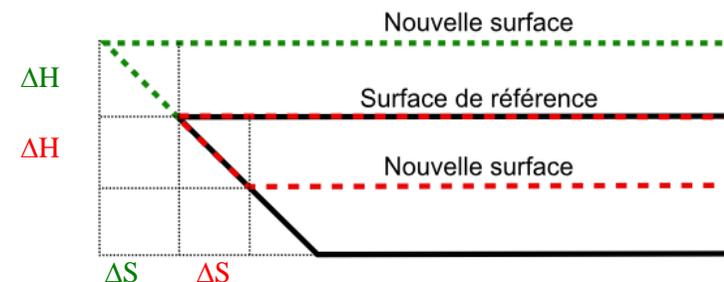


Figure 33 : forme schématique du lac de la Bure

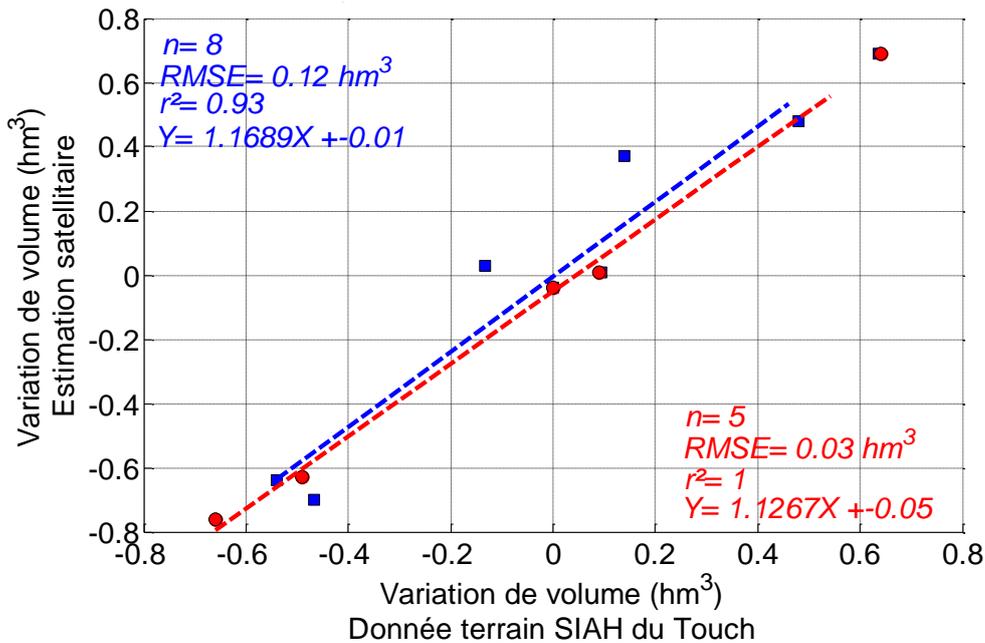


Figure 34 :Raport entre variations de volume estimées par satellite et réelles sur le lac de la bure.

En bleu avec toutes les mesures altimétriques disponibles (sans limite de temps avec l'image SAR HR associée)

En rouge en réduisant à 5 jours l'intervalle de temps entre les deux mesures satellitaires associées.

En comparant les résultats obtenus avec les données terrain enregistrées aux mêmes dates (lac B) figure 34, on obtient une relation quasi linéaire (du type $y = x$) entre les données testées. Les variations de volume estimées à partir des mesures satellitaires sont donc au vu de ces résultats en adéquation avec la réalité terrain. La comparaison entre la courbe bleu et la courbe rouge permet une fois de plus d'insister sur la nécessité de disposer de données quasi synchrones afin d'obtenir de bons résultats.

Par manque de données, nous ne sommes malheureusement pas en mesure d'effectuer la même validation concernant le lac C. Toutefois, au vu des résultats similaires obtenus concernant les données satellitaires sur ces deux masses d'eau (figure 27 et 28) il est raisonnable de penser que les résultats obtenus par cette méthode sont aussi valables sur ce second lac. **Ainsi grâce aux technologies spatiales il nous est possible d'apporter une information supplémentaire indispensable à la gestion d'une retenue d'eau.**

7.4.2. Suivi du volume d'eau disponible à partir de données satellitaires et terrain combinées

A partir des relations établies figure 30 et 32, il est possible de déterminer le volume d'eau stocké dans les lacs au moment de la mesure satellitaire aussi bien de surface (courbe bleu) que de hauteur (courbe rouge). La courbe verte représente quant à elle la réalité terrain (figure 35).

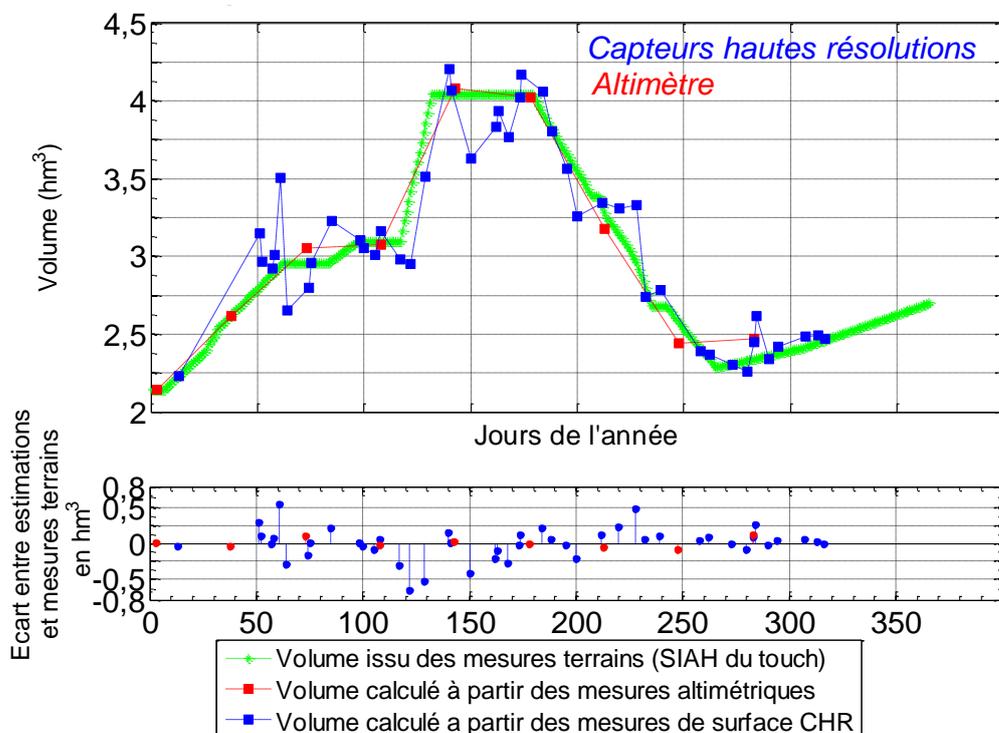


Figure 35 : Comparaison des volumes d'eau estimés selon les trois méthodes (altimétrique, SAR HR ou CHR et mesure terrain).

Lac	RMSE (en m ³)	RMSE (en % par rapport au volume total moyen)	r ²	Ecart MAX (en m ³)	Ecart MAX (en % par rapport au volume total moyen)
SURFACE Capteurs Haute Résolution					
La Bure	140 000	4,88		550 000	18,64
HAUTEUR altimétrique					
La Bure	60 000	1,92		130 000	4,23

Tableau 12 : Indicateurs statistiques sur les estimations de volume CHR et Altimétrique, lac de la Bure 2010.

Lac de la Bure			
Précision		Relation issue des mesures altimétriques	Relation issue des mesures CHR
hm ³	% pas rapport au volume moyen	Pourcentage de mesures associées	Pourcentage de mesures associées
0,01	0,3	22%	7%
0,05	1,6	67%	31%
0,1	3,3	89%	51%
0,13	4,3	100%	62%
0,2	6,6	100%	67%
0,3	10	100%	84%
0,5	16,6	100%	93%
0,55	18,3	100%	96%

Tableau 11 : Seuils de confiance des estimations de volumes réalisées à partir des données satellitaires

Comme le laissent pressentir les résultats statistiques des parties 7.3.1 et 7.3.2, c'est donc l'altimétrie radar qui semble être la technique la plus précise avec une erreur moyenne inférieure à 2% et une confiance sur les estimations extrêmement forte (figure 36 tableau 11 et 12). Ainsi d'après cet exemple, on est capable d'estimer le volume d'un lac de petite taille en zone continentale avec une précision environ égale à 100 000 m³ soit 3% du volume moyen (lac B) avec un seuil de confiance sur cette estimation à 90 %. Pour obtenir ce même seuil de confiance avec les données CHR, la précision obtenue est divisée par quatre (tableau 12).

Cent mille m³, c'est la quantité d'eau nécessaire selon [Tesyssier, Aout 2006] pour l'irrigation de 60 hectares de maïs ou bien encore selon [J.M. Deunier et al., 2006] la quantité d'eau hebdomadaire nécessaire à 340 hectares de maïs en pleine période d'irrigation.

A titre d'exemple, en 2010 on mesure au moyen de l'altimètre un volume d'eau égale à 4 100 000 m³. En prenant donc une marge de sécurité de 100 000 m³, on est en mesure de garantir à 90 % un volume d'eau disponible de 4 000 000 m³. Si maintenant on enlève à cela le volume d'eau non utilisable pour l'irrigation (évaporation 270 000 m³, débit réservé de la retenue d'eau 800 000 m³) soit environs 1,07 million de m³, il reste 2,93 millions de m³ disponibles permettant d'irriguer 1750 hectares.

Cependant, le faible nombre de mesures altimétriques ne permet pas, contrairement aux données de surface, un suivi détaillé de l'évolution des différentes phases de remplissage, vidange, etc., d'où l'intérêt de combiner les deux techniques.

- *L'altimétrie radar servant de référence*
- *L'imagerie SAR HR permettant entre deux mesures altimétriques de donner la tendance du moment.*

8. Étude pluriannuelle – Estimation du volume du lac de la Bure entre 2003 et 2011. Approche altimétrique.

8.1. Comparaison et analyse des cycles annuels

Pour cette nouvelle série de tests, les données de surface seront composées de l'ensemble des données disponibles (CHR et CBR confondus) pour la période 2003-2011.

La figure 36 qui suit, est basée sur le même modèle que la figure 24. Elle traduit la répétition du cycle annuel déjà observé (figure 24) sur une plus longue période. Elle confirme une fois de plus le fait que les différents jeux de données traduisent le même phénomène. Sur cette figure, il est intéressant de comparer les cycles les uns par rapport aux autres. Ainsi, peut-on retrouver les grands événements climatiques qui ont marqué la région durant ces dernières années. L'exemple le plus marquant est la sécheresse de 2003, qui s'est traduite sur le terrain par un niveau des lacs extrêmement bas. Niveau qui apparaît clairement autant dans les mesures de surface que de hauteur (zone grisée de la figure 36).

Cette figure conforte également l'hypothèse concernant la forme des lacs schématisée figure 29, à savoir, une forte sensibilité sur les variations de surface en début de remplissage et inversement sur les variations de hauteur lorsque le lac est presque plein.

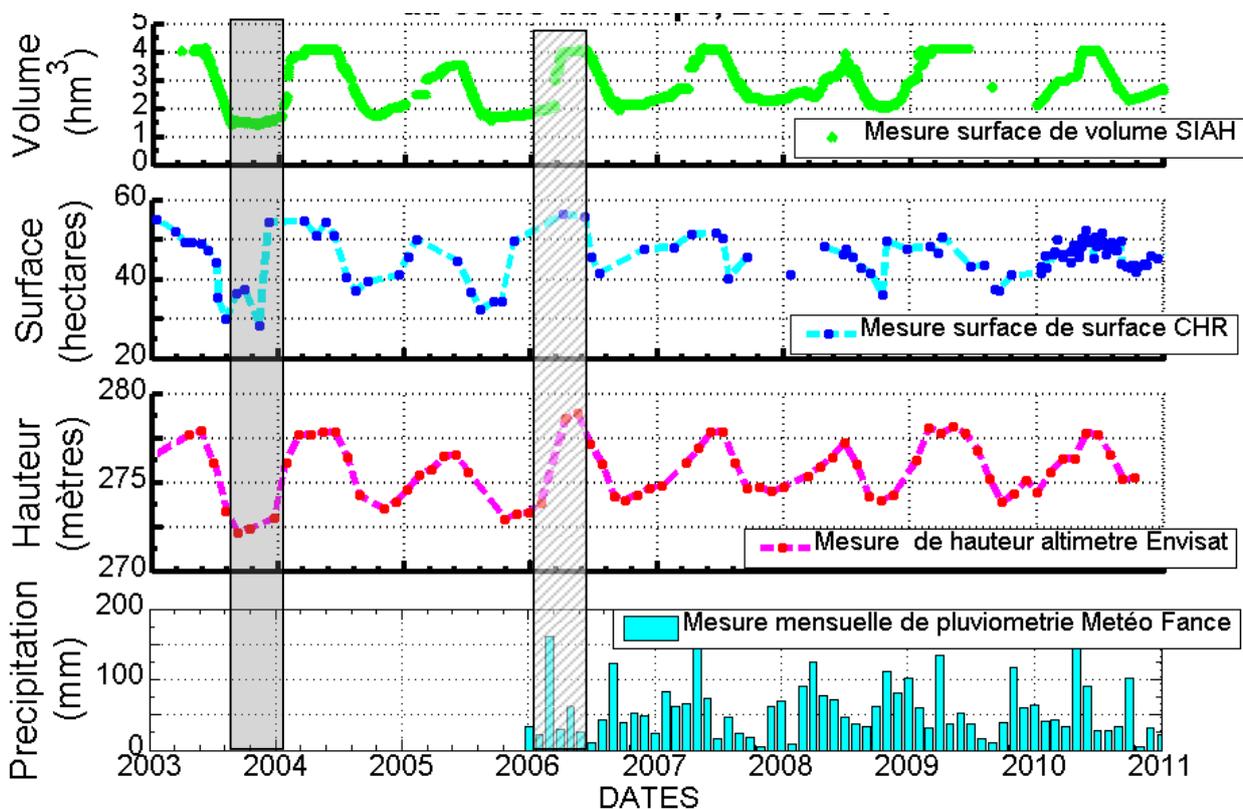


Figure 36 : Évolution temporelle de l'ensemble des données disponibles sur le lac de la Bure pour la période 2003-2011

Deux périodes présentent aux extrêmes de ce remplissage illustrent parfaitement ceci. Il s'agit tout d'abord de l'exemple de la sécheresse de 2003 (zone grisée). Durant cette période, au moment où le lac est à son plus bas niveau, on constate, probablement suite à un fort épisode orageux, une augmentation rapide et brève des valeurs enregistrées (tableau 13 a)). Ceci servira d'échantillon de référence pour les variations de début de remplissage. A l'opposé, la fin du printemps 2006 (zone hachurée) symbolise, si l'on s'en réfère à ce graphique, une période où le lac est à son plus haut niveau (tableau 13 b)). Ce sera donc l'échantillon de référence pour les variations de fin de remplissage.

Type de données	Date des mesures	Hauteurs mesurées (mètres)	Surfaces mesurées (hectares)	Variation sur l'intervalle	Date médiane de l'intervalle de mesure	Décalage entre les intervalles de mesures	Rapport hauteur surface
hauteur	26/09/2003	272,42		-0,2 m	21/10/2003	5 jours	0,022
	15/11/2003	272,22					
surface	25/09/2003		37,44	-9,08 ha	16/10/2003		
	07/11/2003		28,36				
hauteur	17/06/2006	277,18		-1,13 m	04/07/2006	4 jours	0,27
	22/07/2006	276,05					
surface	23/06/2006		45,7	-4,15 ha	08/07/2006		
	17/07/2006		41,55				

Tableau 13 : Comparaisons des sensibilités de chacune des techniques satellitaires en fonction de l'état de remplissage du lac.

Au vu des résultats consignés dans le tableau 13 ci-dessus mais également des deux extraits sélectionnés (figure 36), l'hypothèse émise se vérifie et l'on en vient donc à la conclusion suivante :

Sur ce type de lac, l'altimétrie, en plus d'offrir des résultats corrects pouvant assurer le suivi des lacs de petite taille en zone continentale hétérogène, s'avère être une technique complémentaire du suivi de ces mêmes lacs par variation de surface, en apportant plus de finesse lors de la phase finale du remplissage.

La répétition de ces cycles annuels permet également de faire un bilan hydrique global sur chacune des années en estimant les variations entre ; hauteurs et surfaces initiales et finales. À partir du moment où l'on dispose d'une base de données suffisamment importante (couvrant une période au minimum semblable à celle représentée), il devient possible d'identifier les années exceptionnelles (sèches ou pluvieuses), de déterminer un cycle annuel moyen ou bien encore d'observer une tendance générale sur plusieurs années (tableau 14).

Ce tableau réalisé uniquement à partir de mesures satellitaires nous permet ainsi de comparer les années les unes par rapport aux autres. On s'aperçoit notamment que la sécheresse de 2003 bien que très marquée aurait pu avoir des conséquences bien plus graves si le printemps précédent n'avait pas lui aussi été exceptionnellement pluvieux.

Année	Δ Remplissage	Surface Min	Surface Max	Δ vidange	Année	Δ Remplissage	Hauteur Min	Hauteur Max	Δ Vidange
2003	26,37	28,36	55,16	26,8	2003	5,66	272,18	277,88	5,7
2004		37,12	54,73	17,61	2004		273,5	277,84	4,34
2005	12,92	32,22	50,04	17,82	2005	3	272,95	276,5	3,55
	24,06					5,92			
2006	10,05	41,55	56,28	14,73	2006	3,87	274	278,87	4,87
	6,54					2,78			
2007	14,65	36,15	47,66	11,51	2007	4,09	274,01	277,25	3,24
	15,25					3,86			
2008	15,25	37,16	50,8	13,64	2008	3,86	275,18	277,78	2,6
Min	6,54	28,36	47,66	10,48	Min	2,78	272,18	276,5	2,6
Max	26,37	41,93	56,28	26,8	Max	5,92	275,18	278,87	5,7
Amplitude	19,83	13,57	8,62	16,32	Amplitude	3,14	3	2,37	3,1
Moyenne	15,69	36,95	52,34	15,38	Moyenne	4,17	273,78	277,76	3,98
Ecart type	7,17	4,78	2,91	5,45	Ecart type	1,21	0,92	0,68	0,99

Tableau 14 : Comparaisons des différentes phases de remplissage et de vidange mesurées par satellites sur la période 2003-2010

Globalement on constate que le niveau moyen de la retenue d'eau sur 10 ans reste stable ce qui laisse imaginer que l'irrigation des terres agricoles dans la zone d'influence de cette retenue d'eau se fait de manière raisonnée et durable.

Si l'on disposait d'un historique suffisamment important (une vingtaine d'années minimum), il serait raisonnable de penser observer l'effet du changement climatique en cours, ou bien encore l'impact des activités humaines sur ce type de lac.

8.2. Relation entre données satellitaires et données terrain (ALTIMETRE/VOLUME)

Ne disposant pas d'image haute résolution sur la période 2002-2011, seules les données altimétriques feront l'objet de tests dans cette partie. En reprenant le processus utilisé partie 7.3.2., c'est donc, cette fois ci avec non plus une année de mesure mais neuf années, couvrant la quasi-totalité du remplissage de la retenue d'eau qu'il sera possible d'extraire une relation liant mesure altimétrique et volume terrain.

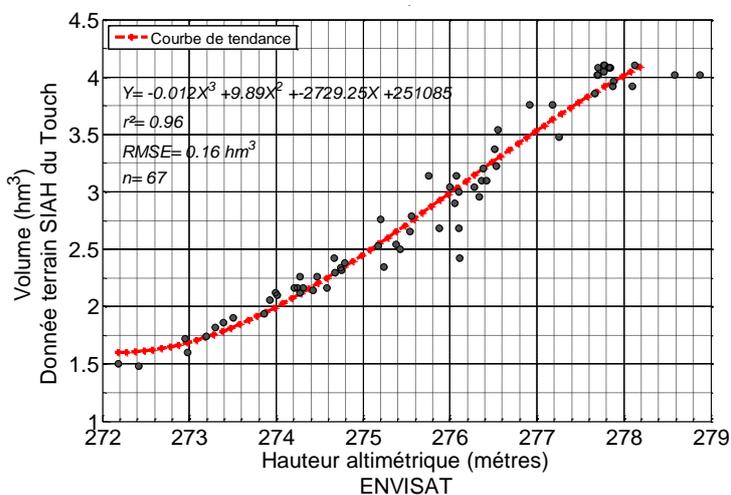


Figure 38 : Mise en relation des variations de hauteur et de volume sur la période 2002- 2011

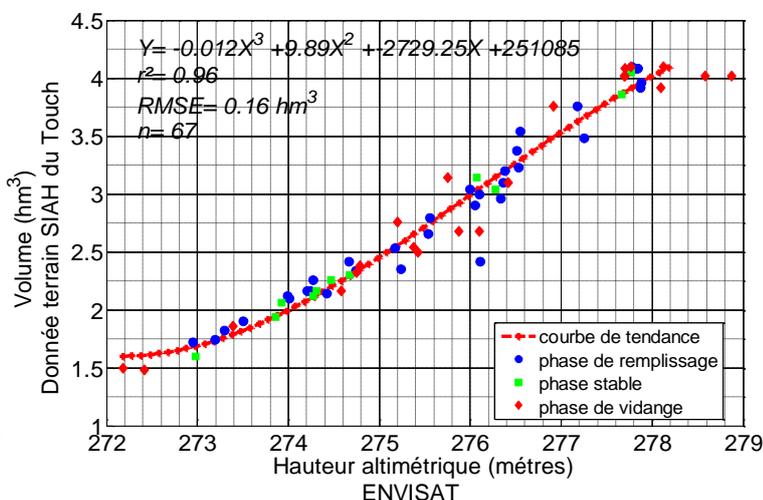


Figure 37 : idem figure 38 avec une différenciation selon l'état du lac (remplissage, stable ou vidange)

La figure 38 est donc celle qui traduit au mieux le remplissage du lac de la Bure dans sa totalité. Cependant, la précision sur l'estimation du volume à partir des mesures altimétriques se voit dégradée par rapport à celle obtenue en 2010 (figure 32) qui ne tenait compte que d'une partie seulement du remplissage (de 2,5%, on passe à 10% du volume moyen) sur le lac de la bure.

À partir de ces données, différents tests ont été effectués, le premier (figure 37) a consisté à séparer les mesures disponibles selon les trois phases déjà identifiées (annexe 7) à savoir « *remplissage, stable et vidange* ». Cette différenciation selon les différentes phases du cycle annuel avait pour but de déterminer si l'une ou l'autre de ces phases présentait des résultats de meilleure qualité que les autres.

Au regard de la (figure 37), ce n'est pas le cas. On peut donc en conclure que, **les mesures altimétriques réalisées sont de qualité équivalente tout au long de l'année (que les abords du lac soit secs ou humides).**

Compte tenu de la dispersion plus grande des mesures sur 10 ans, le second test (figure 40) a consisté à séparer les mesures selon leur année d'enregistrement. Avec cette différenciation, on espère voir si cette dégradation des résultats ne peut pas s'expliquer par des phénomènes non visibles sur une courte période (une seule année) tels que : l'envasement du lac, la dérive des capteurs, le changement climatique, etc.

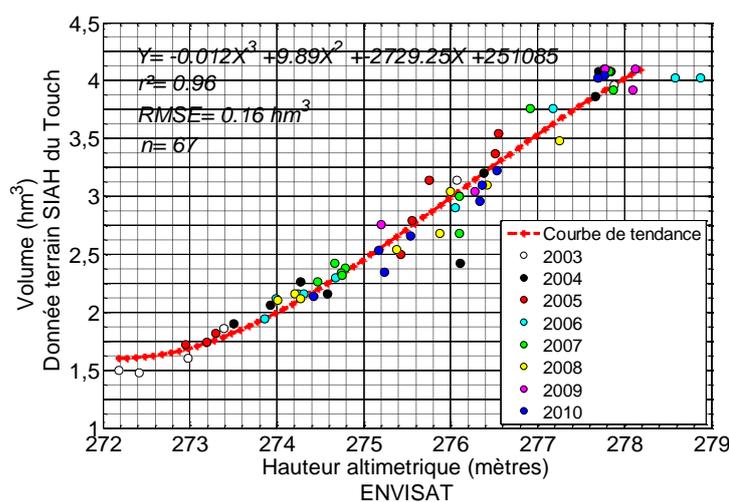


Figure 40 : Idem figure 38 avec une différenciation selon l'années d'enregistrement des mesures

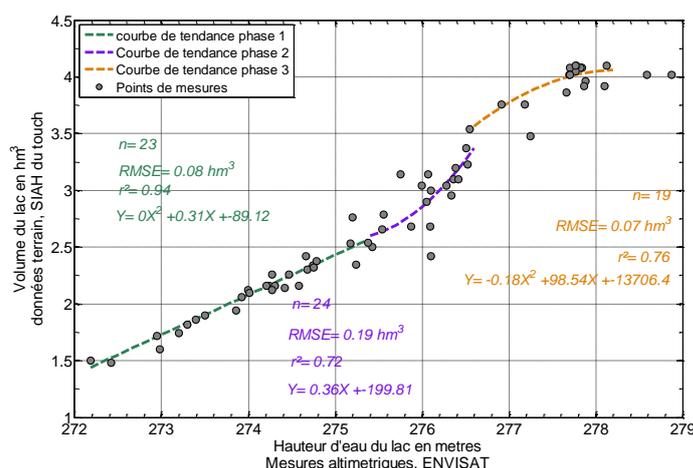


Figure 39 : Idem figure 38 avec cette fois ci une modélisation adaptée à chaque phase caractéristique du lac

Hormis une défaillance du capteur de mesure en 2010 qui à pu être identifiée puis corrigée il n'a pas été identifié de tendance particulière. L'ensemble des données semble de qualité équivalente sur la période 2003-2011.

Afin de retrouver une précision équivalente à 2010, un dernier test a été effectué (figure 39). Celui-ci a consisté en un découpage du remplissage selon les trois étapes observées précédemment (figure 29). En appliquant à chacune d'elles une relation hauteur volume qui lui est propre, l'estimation du volume sur l'ensemble du remplissage devrait en être améliorée.

Cette dernière étape qui affine la modélisation de la relation entre mesures spatiales et mesures terrain (de 10% on redescend à 6,8%) n'est cependant pas reproductible à l'identique sur d'autres lacs. Elle nécessite une adaptation au cas par cas et ne peut se faire qu'après une période d'observation assez longue.

Enfin, en confrontant la courbe de remplissage théorique obtenue d'après les abaques constructeurs et celle calculée à partir des mesures effectuées sur 2010 et 2003-2011, on constate que celles-ci se superposent parfaitement, à un décalage près (décalage induit par la différence de système utilisé pour mesurer les hauteurs (figure 41)).

Ainsi, il ne serait pas aberrant d'utiliser la relation fournie par les abaques dans l'optique de calculer le volume d'eau correspondant à la mesure altimétrique et ceci sur l'ensemble du remplissage du lac, contrairement aux relations précédemment trouvées (figure 31 et 38) qui elles, ne couvrent qu'une partie seulement de ce remplissage.

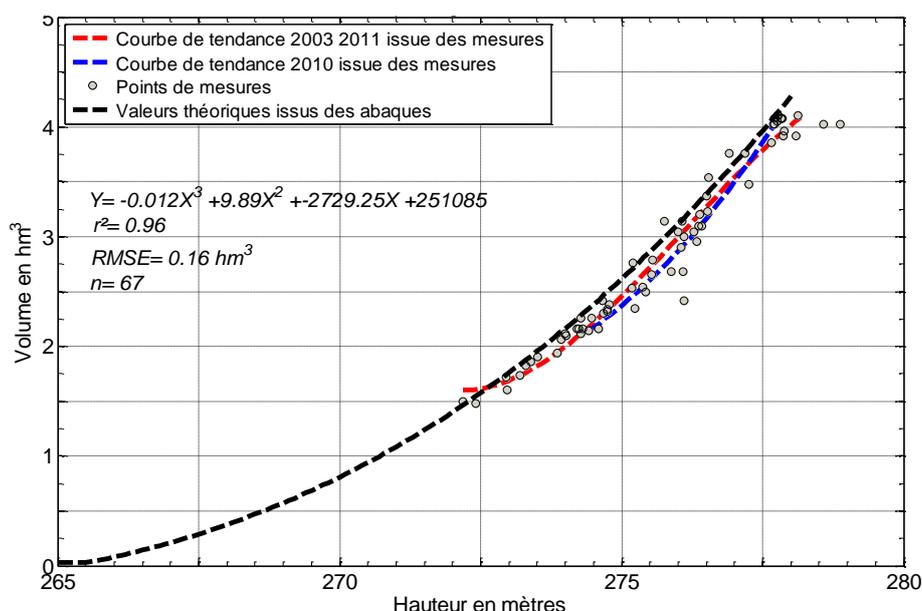


Figure 41 : Comparaison entre les différentes modelisations du remplissage du lac de la Bure

8.3. Estimation des volumes, données satellitaires et terrain

Pour effectuer une comparaison entre volume estimé par l'altimètre et volume réel, on dispose actuellement de trois relations différentes. La figure 42 est l'occasion de les comparer les unes par rapport aux autres. Globalement, les trois estimations sont de bonne qualité sur la période 2003-2010 avec un écart moyen maximum de 5.3% pour l'estimation réalisée à partir des données de 2010 (courbe rouge). Lorsque l'on regarde les estimations fournies par les relations établies sur 2003-2010 (courbes bleu et noire), la précision augmente, l'écart moyen passe sous la barre des 5 % et l'on ne retrouve plus de points aberrants comme c'était le cas pour l'estimation de 2010. Ainsi en utilisant ces relations on gagne en précision d'une part mais on écarte surtout les erreurs de la modélisation précédente ou du moins on les réduit très fortement.

Comparaison des volumes estimés et du volume réel Lac de la Bure 2003-2011

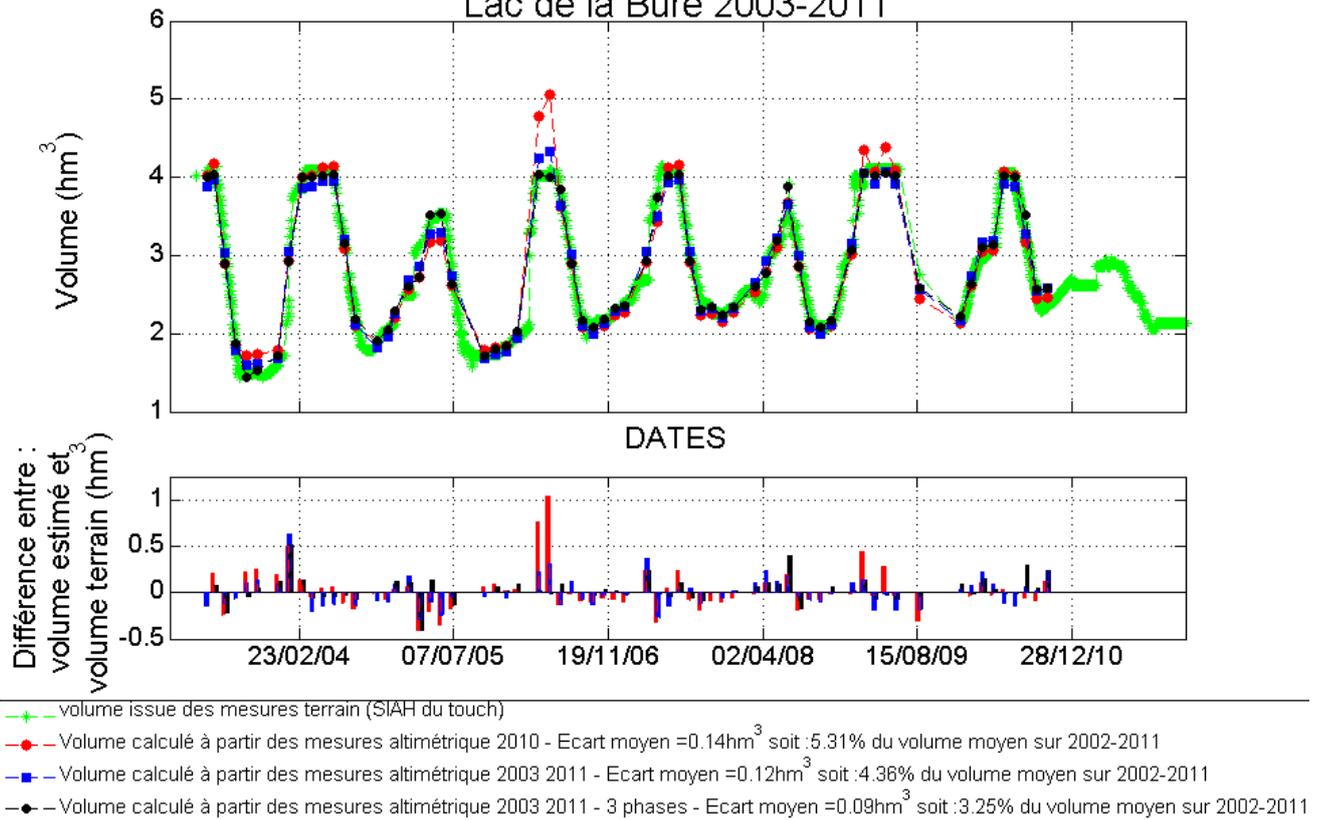


Figure 42

Lac de la Bure				
Précision		Relation P1	Relation P2	Relation P2 (3phase)
hm ³	% pas rapport au volume moyen	Pourcentage de mesures associées	Pourcentage de mesures associées	Pourcentage de mesures associées
0,01	0,4	9%	10%	12%
0,05	1,8	30%	28%	45%
0,1	3,6	55%	49%	70%
0,15	5,5	67%	76%	85%
0,2	7,3	76%	84%	90%
0,3	11	88%	96%	96%
0,5	18,2	96%	99%	99%
1	36,4	99%	100%	100%

Tableau 16

Ceci peut s'expliquer par le fait que la relation 2010 (rouge) ne se base que sur un cycle et donc une seule configuration de remplissage alors que les relations bleu et noire prennent en compte plusieurs types de remplissage ce qui leur permet de mieux s'adapter aux cas spécifiques. C'est le cas par exemple pour la sécheresse de 2003 avec un niveau du lac extrêmement bas, non couvert par le cycle de 2010, ou bien lors du remplissage 2005 2006, le plus rapide et important de la période observée (figure 36), qui ne correspond donc pas non plus à celui du cycle de 2010.

La figure 42 est ainsi un moyen de justifier de l'apport et de l'utilisation de données multi temporelles lors de l'établissement de modèles théoriques.

Au terme de ces tests, on est donc en mesure d'affirmer que « **les mesures altimétriques sont d'une part cohérentes avec la réalité du terrain mais surtout qu'elles semblent dans le cadre de cette étude être de bien meilleure précision que les données de surface pourtant issues de capteurs Haute Résolution.**

9. Discussions - Perspectives

Au travers de cette étude qui nous a permis de mettre en avant le potentiel des données satellitaires pour l'étude et la gestion des petites surfaces d'eau (< 100 hectares), certains points sont restés en suspens faute de temps ou de données. Voici une liste de réflexions qu'il pourrait être intéressant de développer pour approfondir cette étude.

9.1. Sélection des surfaces SAR HR.

Ces surfaces ont été acquises par une classification automatisée (ENVI) appliquée à chaque image dans le but de détecter l'ensemble des masses d'eau visible (cf stage S.Flanquant). En utilisant une classification propre à chaque type d'images utilisées (Terrasar-X, Radarsat-2, Formosat, etc.) et focalisée sur les seules surfaces d'eau susceptibles d'être étudiées, cela permettrait d'affiner cette classification et ainsi d'obtenir des estimations de surface d'une plus grande précision.

La normalisation des données entreprise partie 4 pourrait elle aussi être améliorée. Pour cela, il faudrait sur chacun des lacs établir un modèle de variation des stocks d'eau en fonction des précipitations et de l'utilisation plus ou moins intensive de la ressource. Cela permettrait d'adapter au mieux la fenêtre temporelle utilisée et ainsi maximiser les effets bénéfiques de ce traitement.

9.2. Sélections des lacs suivis par altimétrie radar.

L'ensemble des lacs situés sous une trace altimétrique ne semble à priori pas en mesure de fournir un signal exploitable. Différents critères seraient à explorer pour tenter de trouver une explication scientifique au fait que certains lacs permettent un suivi par altimétrie satellitaire alors que d'autres ne le permettent pas. En voici quelques uns :

- **La topographie aux abords immédiats du lac**

Il apparaît en effet qu'une topographie marquée facilite la sélection des points de mesure. Ce problème est particulièrement visible sur le lac de Muret (lac B) situé en plaine, dans une zone inondable et donc sans relief. Difficile donc d'identifier avec certitude l'emplacement du lac dans le signal, principalement quand celui-ci est plein (différence inférieure à deux mètres).

- **Le type de sol aux abords immédiats du lac (nu, boisé, urbanisé)**

Il semble en effet qu'une masse d'eau entourée de forêts soit plus difficile à détecter qu'une masse d'eau similaire entourée de prairies ou bien de terres agricoles. Cela pourrait s'expliquer par le taux de réflectivité différent de chacune des surfaces (contraste plus faible entre eau et forêt qu'entre eau et prairie) et expliquerait en partie pourquoi les résultats obtenus sur le lac de Savères sont de si mauvaise qualité.

- **La forme du lac**

Elle a probablement elle aussi son importance. En effet plus l'altimètre a la possibilité d'effectuer des mesures au-dessus de la surface en eau, plus les chances d'obtenir de bons résultats augmentent.

- **Les variations potentielles de la surface d'eau (amplitude spatiale et temporelle)**

Elles sont également un facteur déterminant. C'est probablement pour cela qu'il est difficilement possible d'exploiter les données issues du lac de Muret dont les variations sont quasi inexistantes (inférieures à 2 m) et peu prévisibles.

- **Le type d'altimètre utilisé**

Pour le moment les seuls lacs qui ont donné des résultats intéressants ont été enregistrés par l'altimètre RA-2 d'ENVISAT. Peut être celui-ci est-il plus performant en milieu continental ? Selon l'ESA c'est effectivement le cas [ESA bulletin 98 - juin 1999].

A partir de ces pistes, il est alors possible de dégager un profil type d'étendues d'eau susceptibles d'être suivies par altimétrie radar. Ce serait un lac encaissé (fond de vallée) d'une largeur d'au moins 400 mètres (une ou deux mesures directement sur la surface par cycle) et avec de fortes variations de hauteur d'eau (une retenue d'eau).

9.3. Nécessité de disposer de données régulières et de qualité.

Pour parvenir dans les années futures à développer ces techniques de gestion à distance de la manière la plus autonome possible, il est indispensable de disposer d'un maximum de données et cela de manière régulière. Réunir autant de données sur une même zone comme cela a été le cas avec la campagne MCM'10 reste aujourd'hui assez exceptionnel. La multiplication des satellites et la banalisation des données satellitaires entrepris par l'ESA est probablement la solution.

9.4. Comparaison des données

L'une des grandes difficultés dans cette étude fut de disposer de mesures comparables les unes aux autres. Bien souvent il a fallu composer avec des mesures prises à des intervalles de temps variables, allant de quelques heures dans le meilleur des cas à quelques semaines. Comme nous le montrent les nombreux tests réalisés, l'utilisation de mesures synchrones (ou quasi synchrones, inférieures à 5 jours) est une des conditions nécessaires à l'obtention de résultats exploitables. Les futures missions (SWOT en particulier), semblent être la réponse idéale.

CONCLUSION

Ce mémoire avait un double objectif : Tout d'abord, démontrer la capacité de l'altimétrie spatiale à observer des variations de hauteur sur de petites étendues d'eau en milieu continental (< 100 hectares) et dans un second temps proposer une méthode de gestion de ces petites étendues d'eau à partir de données spatiales.

Pour parvenir à cela, l'étude menée s'est appuyée sur une zone parfaitement connue du CESBIO et du GET et extrêmement bien renseignée depuis de nombreuses années, tant en données spatiales qu'en données terrain recueillies principalement dans le cadre du projet Sud Ouest.

Les différents tests réalisés nous ont permis de mettre en évidence le réel potentiel de l'altimétrie radar pour le suivi de très petites masses d'eau continentales est cela avec des précisions (< 30 cm dans plus de 70% des cas) qui égales celles obtenues actuellement sur les grands fleuves tels que l'Amazone ou le Nil.

En combinant ces résultats aux estimations de surface fournies par les capteurs haute résolution (SAR essentiellement) il nous a ensuite été possible de réaliser des estimations de volume à partir de ces seules données satellitaires avec des précisions relativement correctes (écart constaté entre variations réelles et variations estimées de l'ordre de 80 000 m³ pour un volume d'eau total compris entre 1,5 et 4 millions de m³ soit environ 3%.

Enfin, en associant durant quelques années mesures terrains et mesures satellitaires, nous sommes capable d'établir grâce à l'altimétrie principalement, des modèles permettant un suivi est une gestion rigoureuse des volumes d'eau disponibles au cours du temps (précision supérieure à 10% dans 95 % des cas sur le lac de la Bure par exemple).

Ainsi, nous disposons désormais d'une méthode opérationnelle sous réserve de disponibilité des données. Envisat et JASON-2 n'étant plus opérationnels, il faudra attendre Sentinel 1 prévu fin 2013 pour envisager poursuivre ces mesures.

De part ses résultats très prometteurs, cette étude s'inscrit essentiellement dans la préparation des missions, Sentinel-3 et SWOT prévues pour 2014 et 2019 et dont les caractéristiques annoncées permettront de couvrir la totalité du globe (en comparaison avec les 10 % actuellement couverts) avec un enregistrement simultané des mesures de surface et de hauteur permettant d'offrir un suivi encore plus précis et bien plus régulier.

D'un point de vue plus personnel, cette étude réalisée dans le cadre de mon TFE m'a permis de découvrir le monde de la recherche scientifique que je ne connaissais pas. Entouré par des personnes compétentes et réellement passionnées par leurs activités de recherche, j'ai pu, pendant ces cinq mois développer ma propre démarche intellectuelle tout en élargissant considérablement ma culture scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

THESES :

Baup F (2007). Apport Des Donnees Envisat/Asar Pour Le Suivi Des Surfaces Continentales : Application A La Zone Sahelienne. Université Toulouse III - Paul Sabatier.

Bercher N (2008). Précision De L'altimétrie Satellitaire radar Sur Les Cours D'eau : Développement D'une Méthode Standard De Quantification de La Qualité Des Produits Alti-Hydrologiques Etapplications. AGROPARISTECH, Paris.

Coulot D (2005). Télémétrie laser sur satellites et combinaison de techniques géodésiques : contributions aux systèmes de référence terrestre et applications. Observatoire de Paris.

Danilo C (2009).Évaluation des courants de surface océanique au moyen d'un radar à ouverture synthétique. École Doctorale des Sciences de la Mer, Brest.

Frappart F (2006). Hydrologie spatiale : Développement d'applications pour l'utilisation de la télédétection sur les grands bassins fluviaux. Université Toulouse III - Paul Sabatier.

Leon J.G (2006). Utilisation conjointe de l'altimétrie spatiale et de la mesure in-situ pour la régionalisation du débit dans le Bassin Versant du Rio Negro. Université Toulouse III - Paul Sabatier.

Ollivier A (2006). Nouvelle approche pour l'extraction de paramètres géophysiques à partir des mesures en altimétrie radar. Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal, Grenoble.

Severini J (2010). Estimation et Classification des Signaux Altimétriques. Université Toulouse III - Paul Sabatier.

ARTICLES SCIENTIFIQUES :

Baup, F., Fieuzal, R., Marais-Sicre, C., Dejoux, J. F., le Dantec, V., Mordelet, P., ... & Kidd, R. (2012, July). MCM'10: An experiment for satellite multi-sensors crop monitoring from high to low resolution observations. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International* (pp. 4849-4852). IEEE.

Berry, P. (2006). An original retracking expert system for continental water level monitoring, communication personnelle (mars 2006, venise).

Berry, P. A. M., Smith, R. G., & Freeman, J. A. (2007). What has 16 years of Satellite Radar Altimetry given us towards Global monitoring of the Earth's inland water resources?. In *Vortrag beim Hydrospace07 workshop*.

Berry, P., Garlick, J., Freeman, J. Et Mathers, E. (2005). Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophys. Res. Lett.*, 32:L16401, doi :10.1029/2005GL022814.

Birkett, C. (1998). Contribution of the topex nasa radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands. *Water Resources Research*, 34.

Bramer, S. M. S., & Berry, P. A. M. River Mapping from Satellite Radar Altimeter Sigma0.

Cartwright, D. E., and R. J. Taylor, New computations of the tide-generating potential, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 23, 45-74, 1971.

Chelton, D., Ries, J., Haines, B., Fu, L.-L. Et Callahan, P. (2001). *Satellite Altimetry*. In : Fu, L.-L., Cazenave, A. (Eds), *Satellite altimetry and Earth sciences*, volume 69 de *International geophysics*, chapitre 1, pages 1–131. Academic press.

Crétaux, J. F., & Birkett, C. (2006). Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(14), 1098-1112.

Crétaux, J.-F., Kouraev, A., Papa, F., Bergé Nguyen, M., Cazenave, A., Aladin, N. Et Plotnikov, I. (2005). Water balance of the big aral sea from satellite remote sensing and in situ observations. *J. Great Lakes Res.*, 31 (4).

Deumier, J.M., Lacroix, B., Bouthier, A., Verdier, J.L., Mangin, M. (2006). Stratégies de conduite de l'irrigation du maïs et du sorgho dans les situations de ressource en eau restrictive. www.irrinov.arvalisinstitutduvegetal.fr

ESA, ALCATEL Space, 2003. *ENVISAT-1 Products Specifications Volume 14 : RA-2 Products Specifications*.

ESA, De Montfort University, E.A.P.R.S, 2006. *ENVISAT-ERS Exploitation River and Lake Product. Product Handbook (issue 2.1, February 2006), DMU-RIVL-SPE-03-110*.

Fatras, C., Frappart, F., Mougin, E., Grippa, M., & Hiernaux, P. (2012). Estimating surface soil moisture over Sahel using ENVISAT radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 123, 496-507.

Frappart, F., Calmant, S., Cauhopé, M., Seyler, F. Et Cazenave, A. (2006). Preliminary results of envisat ra-2 derived water levels validation over the amazon basin. *Remote Sensing of Environment*, 100:252–264.

Frappart, F., Seyler, F., Martinez, J.-M., Leon, J. G. Et Cazenave, A. (2005). Floodplain water storage in the negro river basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. *Remote Sensing of Environment*, 99:387–399.

Freeman, J., & Berry, P. A. (2006). A new approach to retracking ocean and coastal zone multi-mission altimetry. *ESA SP*, 614.

Fu, L.-L. Et Cazenave, A. (2001). *Satellite altimetry and Earth sciences*, volume 69 de *International geophysics*. Academic press.

Guzkowska, M., Rapley, C., Ridley, J., Cudlip, W., Birkett, C. Et Scott, R. (1990). Developments in inland water and land altimetry. In *ESA Contract, CR-7839/88/F/FL*.

Koblinsky, C. J., Clarke, R. T., Brenner, A. C. Et Frey, H. (1993). Measurement of river level variations with satellite altimetry. *Water Resources Research*, 29:1839–1848.

Mercier, F. (2001). *Altimétrie spatiale sur les eaux continentales : apport des missions TOPEX/POSEIDON et ERS1&2 à l'étude des lacs, mers intérieures et bassins fluviaux*.

Mercier, F., Cazenave, A. Et Maheu, C. (2002). Interannual lake level fluctuations (1993-1999) in africa from topex/poseidon : Connection with ocean-atmosphere interactions over indian ocean. *Global Planet, Change* 32:141–163.

Rapley, C., Guzkowska, M., Cudlip, W. Et Mason, I. (1987). A exploratory study of inland water and land altimetry using seasat data. In *ESA Contract Report 6483/85/NL/BI*.

Santos da Silva, J., Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O. C., Cochonneau, G., & Mansur, W. J. (2010). Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*, 114(10), 2160-2181.

Tessier, F. Août 2006. LES CONSOMMATIONS D'EAU POUR IRRIGATION EN MIDI-PYRÉNÉES, Surfaces irriguées et volumes d'eau consommés. Rapport avec le climat, la PAC, les ressources sur la période 2001-2005.

RAPPORTS

Flancart. S (2011). Suivi satellitaire des réserves hydriques en zone agricole.

SITES INTERNET :

Site consacré à l'altimétrie radar, <http://www.aviso.oceanobs.com/en/>

Site d'aide à l'utilisation de matlab, http://enacit1.epfl.ch/cours_matlab/

Site de l'agence de l'eau, <http://adour-garonne.eaufrance.fr/accueil>

Site de l'Agence Spatiale Canadienne, <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/Default.asp>

Site de l'Agence Spatiale Européenne, <http://www.esa.int/ESA>

Site de la société Astrium, <http://www.astrium.eads.net/fr/>

Site du Centre d'études Spatiales de la BIOSphère, <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/>

Site du Centre National d'Etudes Spatiales, <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/7107-scientifiques.php>

Site du Jet Propulsion Laboratory, <http://www.jpl.nasa.gov/missions/past/seasat.html>

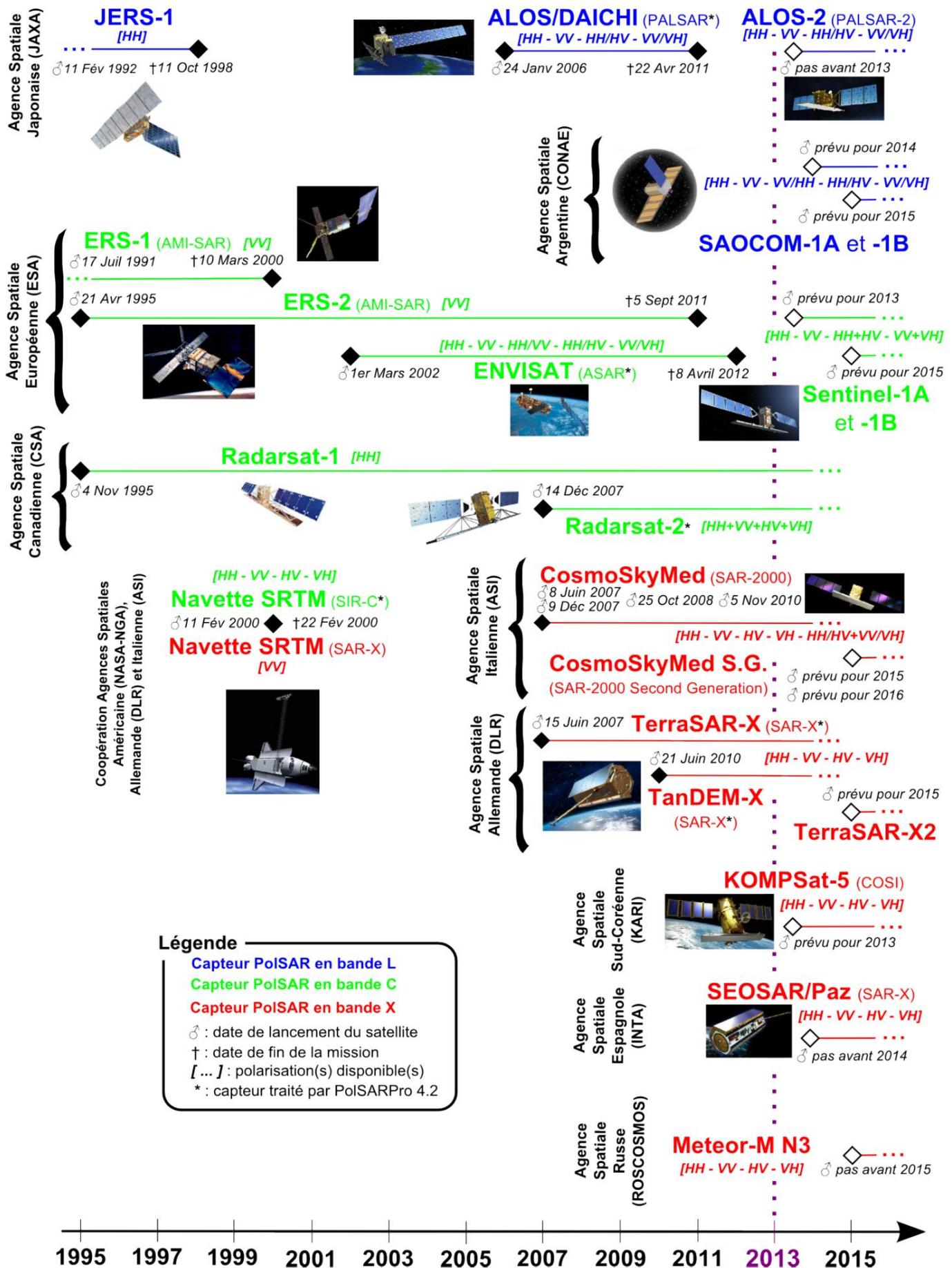
Site du Laboratoire d'Etude en Géophysique et Océanographie Spatiale, <http://www.legos.obs-mip.fr/>

Encyclopédie en ligne, http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal

TABLE DES ANNEXES

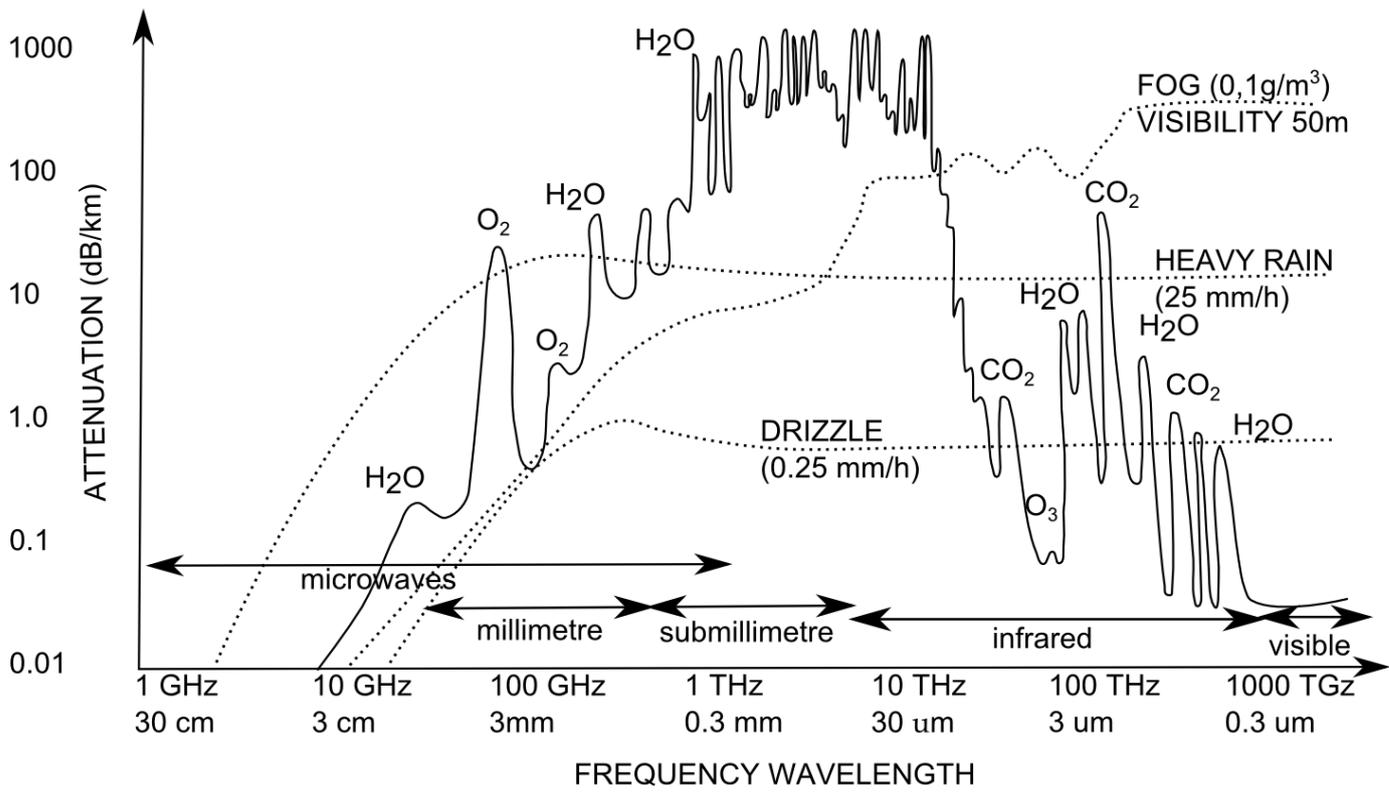
Annexe 1: Historiques des principaux capteurs PolSAR spatiaux lancés depuis 1995.....	58
Annexe 2 : Chronologie des principales missions altimétriques de 1978 à nos jours et à venir (completé à partir d'un tableau réalisé par Nicolas Bercher, 2008).....	59
Annexe 3: Atténuation due à l'atmosphère, introduction to microwawe remote sensing.....	60
Annexe 4 :Caractéristiques de la forme d'onde.....	61
Annexe 5 : Emplacement et caractéristiques des 4 lacs retenus.....	62
Annexe 6:Correction dans la sélection de points suite à la visualisation d'une première série temporelle.....	63
Annexe 7 : Décomposition d'un cycle annuel selon les 3 grandes phases (remplissage, stable, vidange).....	64
Annexe 8 : Utilisation du levé bathymétrique du lac de la bure	65

Annexe 1: Historiques des principaux capteurs PolSAR spatiaux lancés depuis 1995

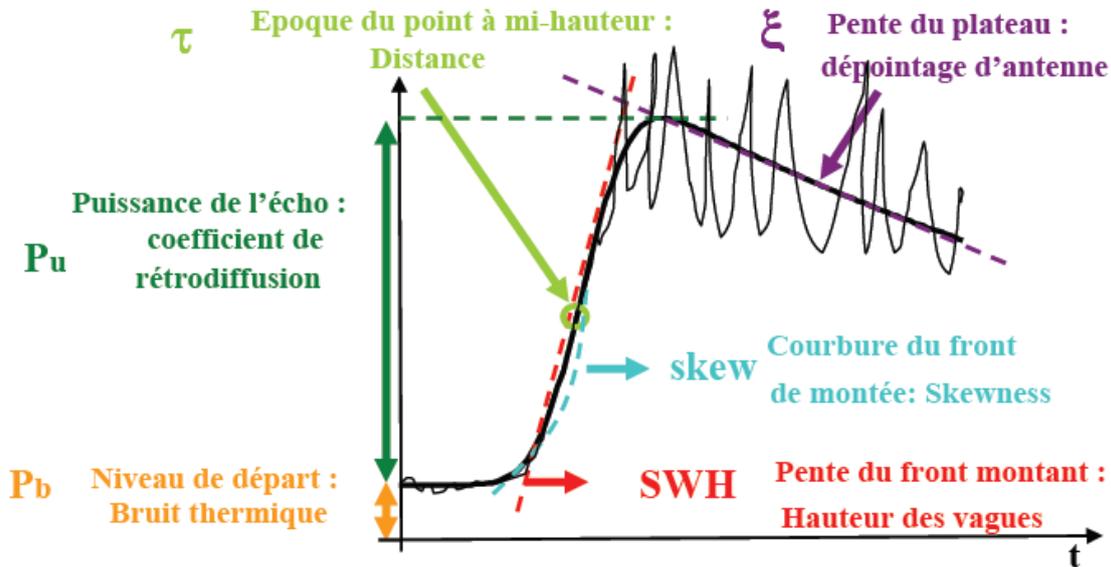


SOURCE : DONNÉES RECUEILLIES SUR LE SITE OSCAR SPACE, WWW.WMO-SAT.INFO/OSCAR/
ILLUSTRATION : YANNICK PHILIPPETS

Annexe 3: Atténuation due à l'atmosphère, introduction to microwave remote sensing



Annexe 4 : Caractéristiques de la forme d'onde



P_b Puissance de bruit Thermique : le premier plateau de la forme d'onde représente son niveau de bruit thermique qui est le niveau de puissance reçue par l'altimètre lorsqu'il fonctionne en radar passif.

SWH Hauteur significative des vagues : La puissance reçue par le radar augmente avec une pente liée à la différence de hauteur entre le creux et la crête des vagues. La hauteur significative des vagues ou *Significant Wave Height* est définie comme la moyenne de la hauteur crête à crête du tiers des vagues les plus hautes.

Skew Coefficient de skewness : Selon la forme des vagues, la pente du front de montée possède une courbure plus ou moins forte. Cette courbure est liée au skewness, visuellement, l'axe de symétrie d'une densité de probabilité avec un skewness non nul est incliné par rapport à la verticale. Ce paramètre est détaillé dans [Kerbaol et Chapron 1999].

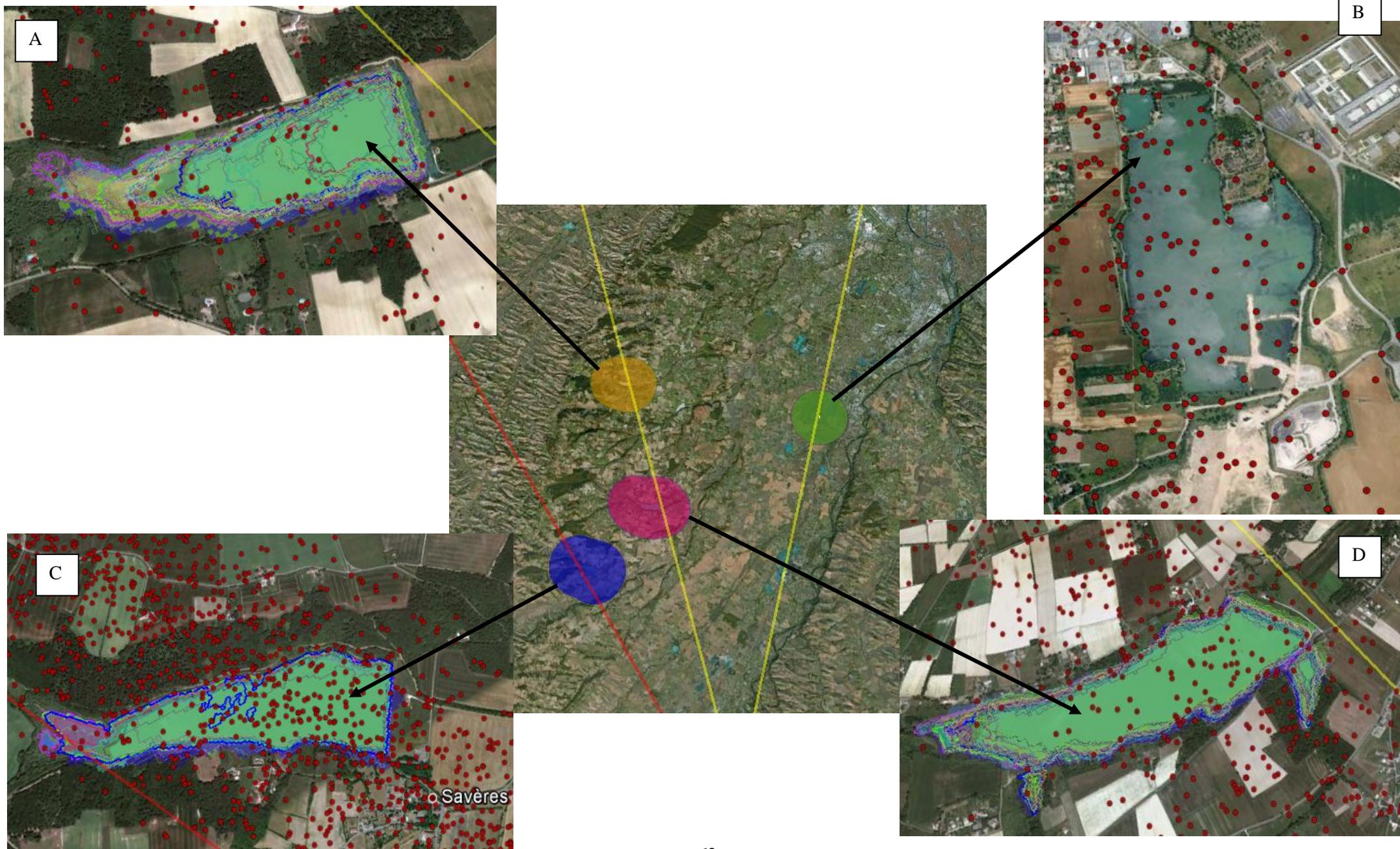
τ **L'époque du signal** est la correction d'estimation de la distance altimétrique faite par le tracker. C'est la position du point à mi puissance de la forme d'onde par rapport au milieu de la fenêtre d'analyse. Il correspond à l'instant où l'onde arrive sur la surface moyenne éclairée. Il est défini comme l'instant auquel la puissance reçue est égale à la moitié de la puissance totale P_u

P_u Puissance : La puissance de la forme d'onde augmente jusqu'à ce que le creux des vagues ait été éclairé par l'onde. A ce moment la puissance reçue est maximale. Cette puissance est la correction d'estimation du coefficient de rétrodiffusion σ_0 faite par le tracker. Elle permet par exemple d'estimer la puissance du vent car moins il y a de vent, plus la surface de l'océan se comporte comme un miroir et plus elle renvoie d'énergie dans la direction du satellite (P_u élevé).

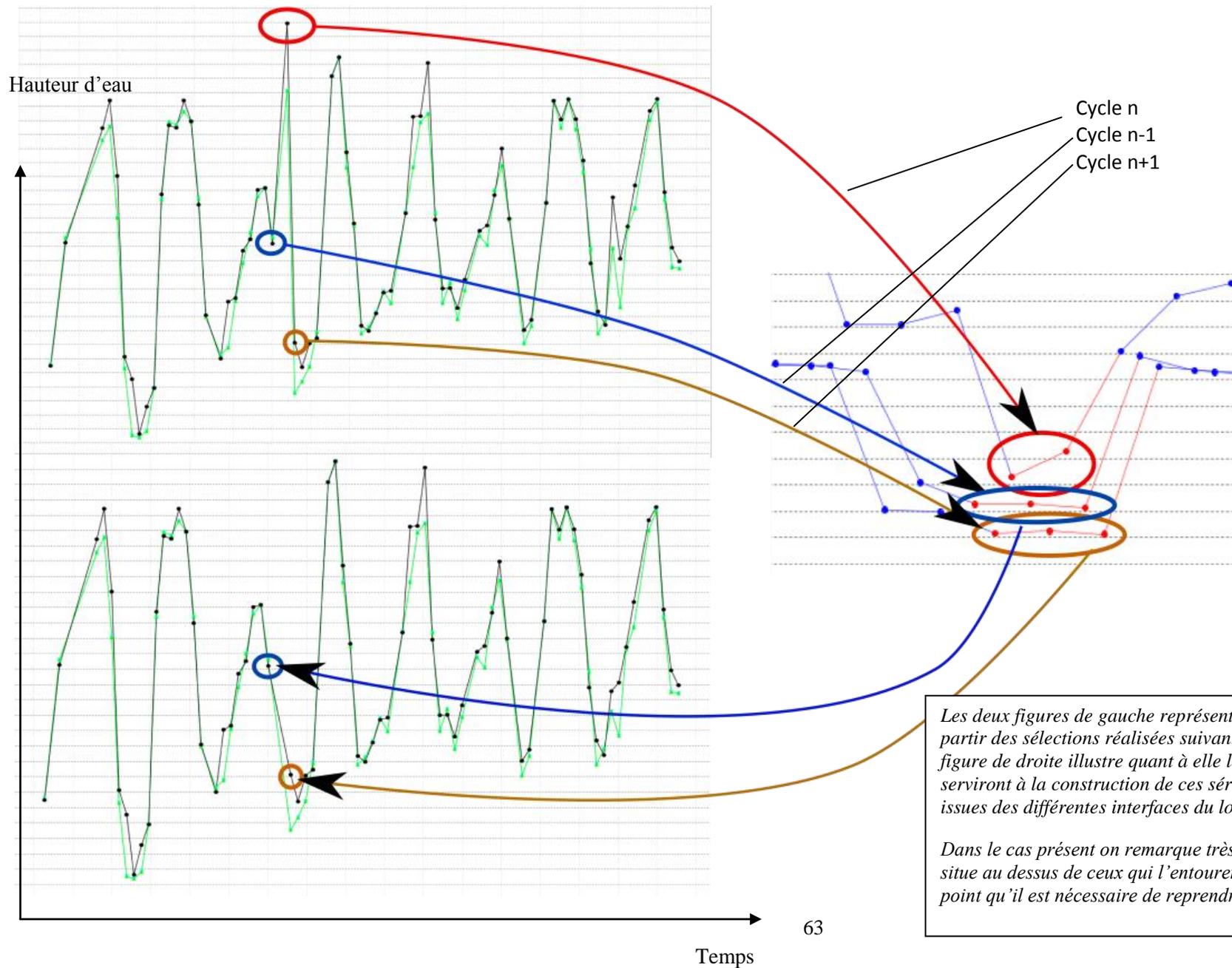
ξ **Attitude ou dépointage** : La puissance reçue par les bords de l'antenne radar décroît avec le gain d'antenne de façon proportionnelle à la distance au nadir. Si l'antenne dévie de sa visée nadir, on peut calculer sa déviation appelée dépointage en calculant la pente du plateau. Cette pente peut être positive si le dépointage est fort.

Annexe 5 : Emplacement et caractéristiques des 4 lacs retenus.

(A. lac de Sainte-Foy B. lac de Muret C. lac de Savères D. lac de La Bure)



Annexe 6: Correction dans la sélection de points suite à la visualisation d'une première série temporelle.



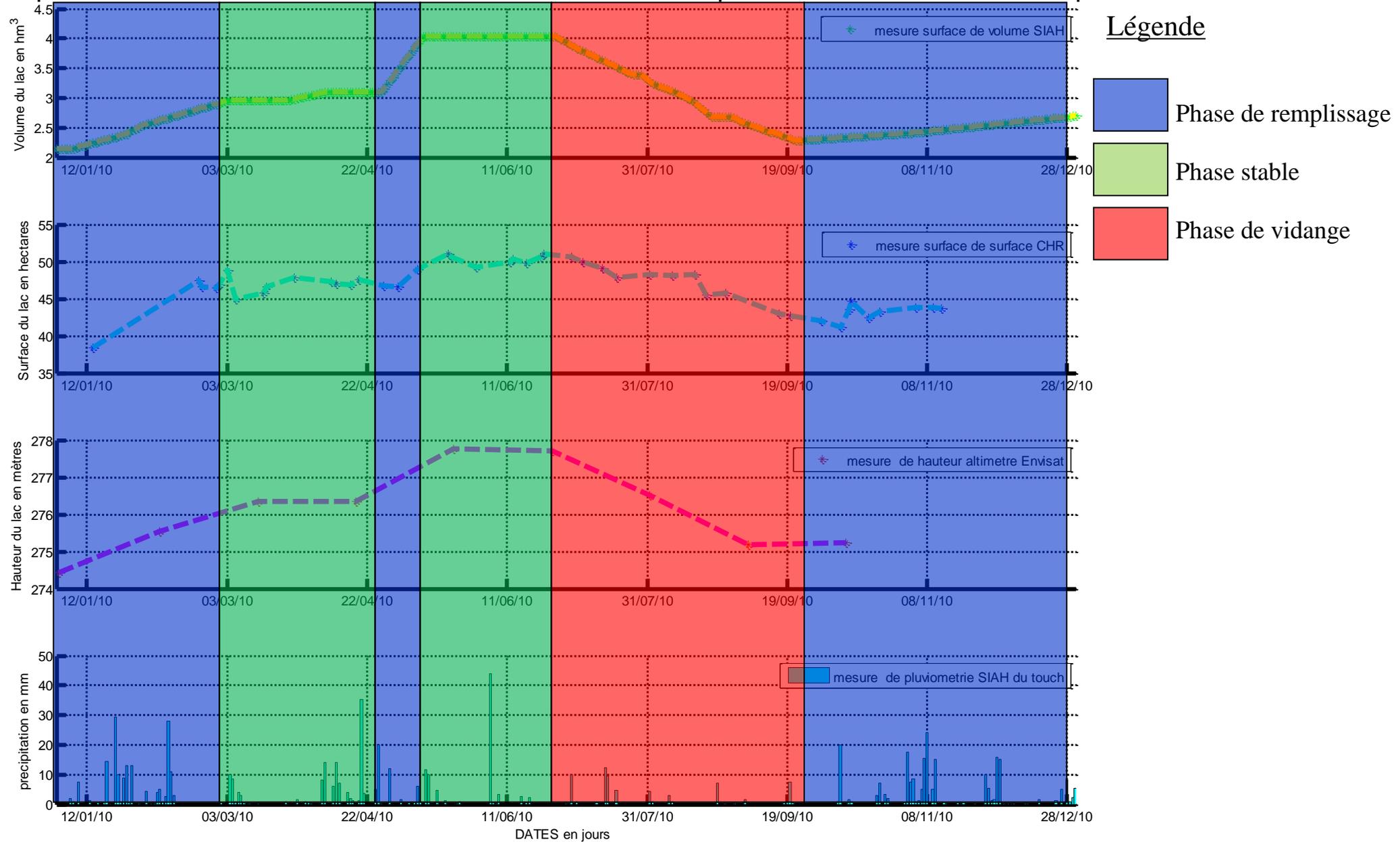
Les deux figures de gauche représentent les séries temporelles créées à partir des sélections réalisées suivant le protocole défini au dessus. La figure de droite illustre quant à elle la fenêtre de sélection des données qui serviront à la construction de ces séries temporelles. Les deux figures sont issues des différentes interfaces du logiciel VALS.

Dans le cas présent on remarque très nettement qu'un cycle (rouge) se situe au dessus de ceux qui l'entourent (bleu et orange). C'est ce genre de point qu'il est nécessaire de reprendre un à un pour réduire les erreurs.

Annexe 7 : Décomposition d'un cycle annuel selon les 3 grandes phases (remplissage, stable, vidange)

Lac de la Bure 2010.

Comparaison des variations de volume, surface, hauteur et pluviométrie au cours du temps

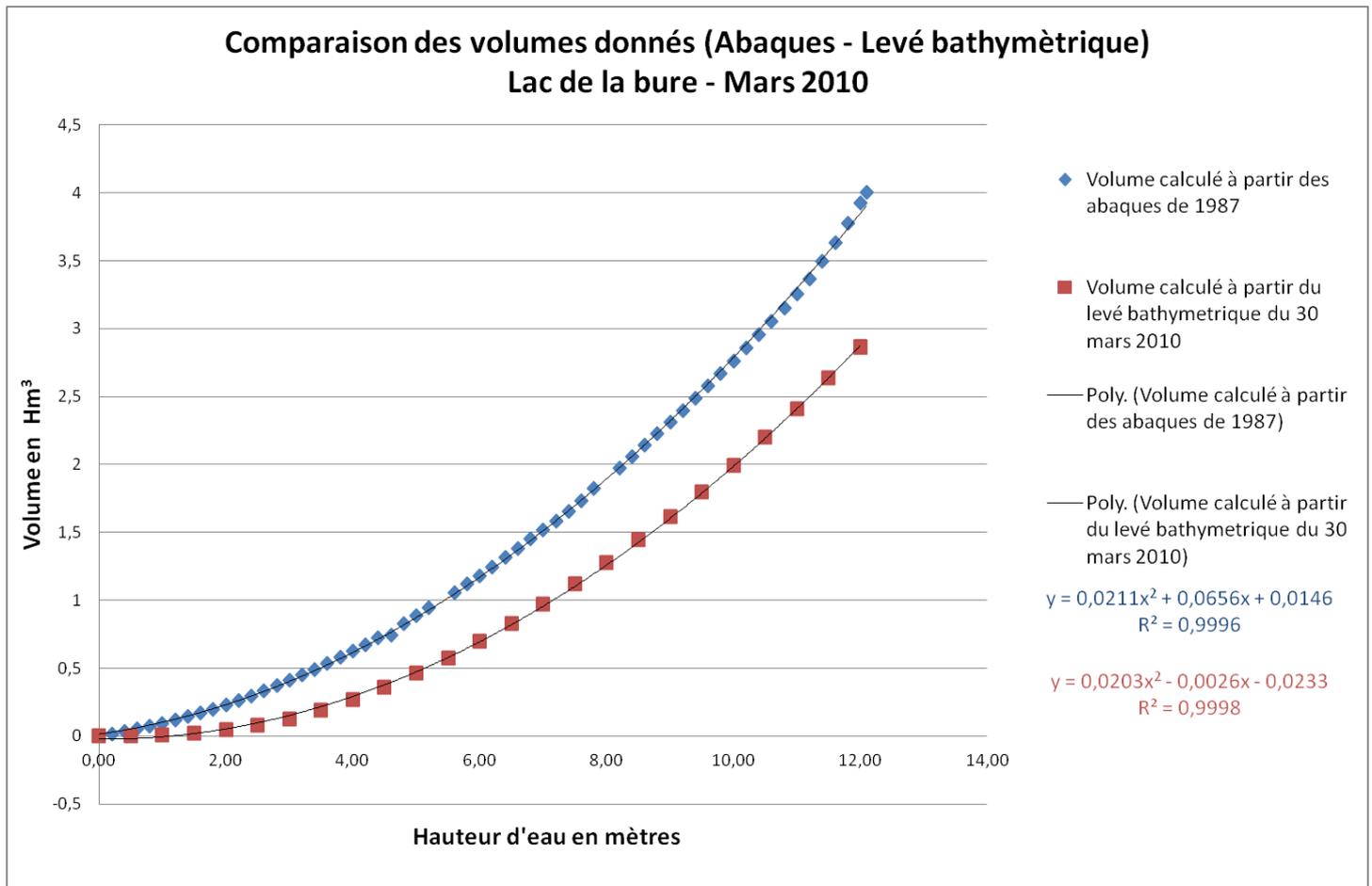


Annexe 8 : Utilisation du levé bathymétrique du lac de la bure

A partir du levé bathymétrique (nuage de point) réalisé par l'agence de l'eau j'ai pu modéliser en trois dimensions la retenue d'eau de la bure. Ce travail complémentaire a eu pour objectif principal de vérifier la pertinence de la relation hauteur volume donné par les abaques.

Cette relation qui a été calculée lors de la construction de la retenue d'eau en 1987 n'a fait l'objet d'aucun contrôle ou réajustement depuis. Il est donc possible qu'en l'espace de 20 ans cet ouvrage se soit ensasé, que sa topographie sous-marine ait légèrement été modifiée. Modification qui introduit inévitablement une erreur dans l'estimation du volume réalisée au quotidien par le SIAH du Touch sur la base de ces abaques.

Ainsi, en comparant les volumes calculés à partir de la modélisation 3D réalisée sous Arcgis et ceux obtenus à partir des abaques il sera possible de déterminer si ceux-ci sont toujours utilisables, ou bien s'il est nécessaire de les réajuster.



A partir du graphique précédent, on constate un décalage entre les deux séries de données. Décalage qui intervient uniquement au tout début du remplissage et qui se répercute sur l'ensemble du cycle. Cependant ce décalage peut s'expliquer par la méthode utilisée lors de la réalisation du levé bathymétrique. En effet, le maillage utilisé étant assez grossier, une ligne de mesures tous les 100 mètres environ il est fort probable que le fond de la retenue soit assez mal décrit et donc que le volume estimé par cette méthode ait du mal à « augmenter » en début de remplissage.

D'autre part en comparant les volumes donnés à la date du levé (30 mars 2010) par l'une et l'autre des méthodes, 2 800 714 m³ pour les abaques contre 2 863 242 m³ pour la bathymétrie on constate un écart d'environ 60 000 m³ soit 2% du volume mesuré. Au vu de cet écart relativement faible il est raisonnable de considérer les abaques fournis par le constructeur en 1987 toujours fonctionnels. Cela nous permet de confirmer l'impression donnée par des plongeurs récemment intervenus sur la retenue d'eau, à savoir un très faible taux d'ensasement au niveau du barrage.

Pour conclure sur l'apport de ces données bathymétriques, celles-ci nous permettent de valider en partie la précision des mesures de volume terrain utilisées lors des différents tests effectués durant cette étude.

Pour valider définitivement ces mesures de terrain il faudrait procéder à un réétalonnage de la sonde de mesure, chose qui n'a pas été faite à notre connaissance depuis de nombreuses années.

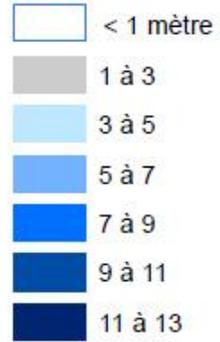
Modélisation du reservoir de La Bure



Légende

Bathymétrie
levé réalisé le 30 mars 2010

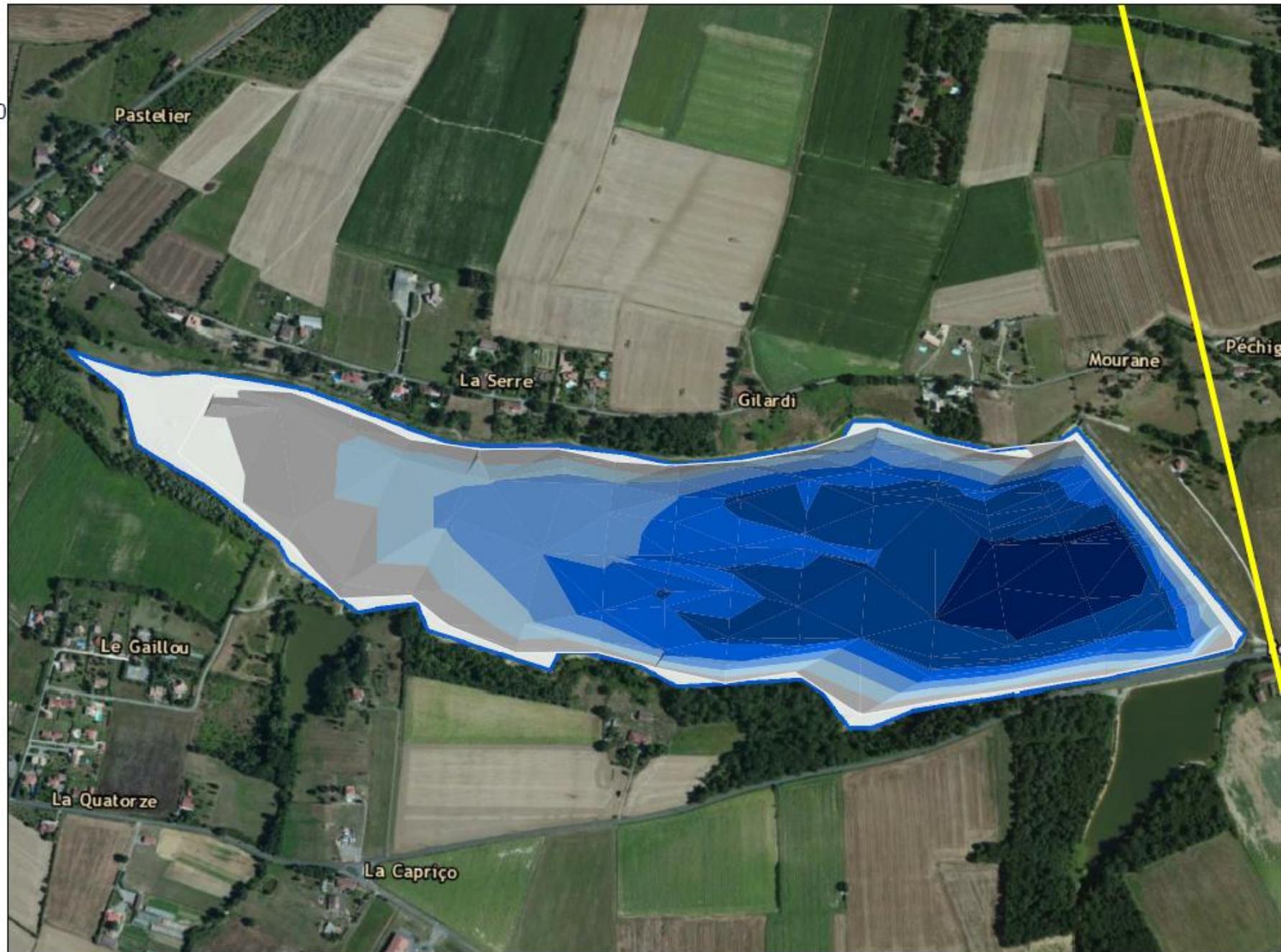
Classe de profondeur (en mètres)



- Contour du lac
- Trace altimétre Envisat

0 50 100 200
Mètres

Fond de carte :
World Imagery (Arcgis)



LISTE DES FIGURES

Figure 1: Spectre électromagnétique et détail des bandes en Hyperfréquences - Source F. Baup, 2006	8
Figure 2: Résolution d'un radar (RAR) – illustration Yannick Philippets, Floriane Flis (ENSG).....	10
Figure 3: illustration de la comparaison proposée par F.Ulaby – source - Céline Danilo, 2009.....	11
Figure 4: Principe général de la propagation d'un champ électrique à une interface entre deux milieux (dioptrique).- Source G. Brotons, WWWunit.eu.....	12
Figure 5 : Couverture globale de JASON-2 (rouge) et Envisat (Jaune).....	13
Figure 6 : Direction et puissance du signal réfléchi en fonction de la surface rencontrée	14
Figure 7: Principe de l'altimétrie satellitaire © CNES.....	15
Figure 8:Exemple de diminution du bruit dans la réponse altimétrique par intégration sur 90 mesures pour Topex/Poséidon © - http://www.altimetry.info/	16
Figure 9 Formation d'une forme d'onde sur un océan de surface plane a) et sur ce même océan de surface agité b) © CNES	16
Figure 10 : illustration du phénomène d'accrochage.....	18
Figure 11 : illustration du phénomène d'accrochage, J. Leon	18
Figure 13 : Emplacement de la zone d'étude avec superposition des traces altimétriques des satellites ENVISAT (jaune) et Jason 2 (rouge) et de l'ensemble des lacs survolés (bleu) et retenus pour l'étude (vert).- image google earth.	20
Figure 14: Moyenne des précipitations mensuelles sur la zone (1971 2000) - crédit Météo France. ...	21
Figure 15 : abaques datant de l'époque de construction modélisant le remplissage des lacs A (courbe bleu), B (courbe rouge) et C (courbe noire).	22
Figure 16 : Chronogramme des acquisitions satellitaires sur 2010 (Baup et al., 2012).....	22
Figure 17 : Suivi des variations de surface réalisées sur le lac C (figure de gauche) et du lac B (figure de droite) au cours de l'année 2010. Chaque capteur utilisé est représenté par une couleur différente.....	25
Figure 18 : idem figure 17 avec cette fois-ci une classification selon les deux catégories de capteurs identifiées, à savoir CHR (rouge) et CBR (Bleu).....	26
Figure 19 : Processus de traitement des données altimétriques.....	27
Figure 20 : exemple de station virtuelle sur le lac de la Bure. La trace théorique de l'altimètre est représentée en trait plein jaune, alors que les points nadirs réels sont notés par des carrés rouges et blancs.....	28
Figure 21 : nuages de points brutes correspondant aux 4 lacs.	28
Figure 22 : Coupe Altimétrique au niveau des lacs observés avec présence d'un U plus ou moins marqué au niveau du lac.....	29
Figure 23 Comparaisons entre hauteurs altimétriques et hauteurs terrain, lac B	31
Figure 24 Comparaisons entre hauteurs altimétriques et hauteurs terrain, lac A	31
Figure 25 : Évolution temporelle de l'ensemble des données disponibles sur chacun des 3 lacs (A,B et C).....	32
Figure 26 :Résultats des trois tests réalisés sur le lac A	33
Figure 27 : Résultats des trois tests réalisés sur le lac B	34
Figure 28 : Résultats des trois tests réalisés sur le lac C	34
Figure 29 : Forme générale des retenues d'eau observées, déduite des rapports entre variation de surface et variation de hauteur.....	35
Figure 30 : Comparaison des données de surface (satellites) et de volume (terrain) sur les lacs A et B.	36
Figure 31 : Comparaison des relations surface volume obtenues sur le lac B en fonction de la résolution des données de surface utilisées - rouge CHR et bleu CBR.	37
Figure 32 : Comparaison des données de hauteur (satellites) et de volume (terrain) sur le lac B avec en figure 32 a) l'impact de l'intervalle de temps entre les mesures associées et en figure 33 b) la relation obtenue avec des données prises le même jour.	38
Figure 33 : forme schématique du lac de la Bure.....	40
Figure 34 :Rapport entre variations de volume estimées par satellite et réelles sur le lac de la Bure.....	41

Figure 35 : Comparaison des volumes d'eau estimés selon les trois méthodes (altimétrique, SAR HR ou CHR et mesure terrain).....	42
Figure 36 : Évolution temporelle de l'ensemble des données disponibles sur le lac de la Bure pour la période 2003-2011.....	44
Figure 37 : idem figure 38 avec une différenciation selon l'état du lac (remplissage, stable ou vidange).....	46
Figure 38 : Mise en relation des variations de hauteur et de volume sur la période 2002- 2011	46
Figure 39 : Idem figure 38 avec cette fois-ci une modélisation adaptée à chaque phase caractéristique du lac	47
Figure 40 : Idem figure 38 avec une différenciation selon l'année d'enregistrement des mesures	47
Figure 41 : Comparaison entre les différentes modélisations du remplissage du lac de la Bure.....	48
Figure 42	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Chronogramme des acquisitions SPOT.....	23
Tableau 2 : indicateur statistique sur les périodes P1 et P2 en fonction des données utilisées	26
Tableau 3 : récapitulatif du nombre de mesures utilisables à la fin du protocole sur les 4 lacs	29
Tableau 4 (à droite) : indication sur les écarts mesurés entre les deux jeux de données testés figure 24	31
Tableau 5 (à gauche) : indication sur les écarts mesurés entre les deux jeux de données testés figure 25	31
Tableau 6 : indicateurs statistiques des relations Surface Hauteur (satellites) des lacs B et C	35
Tableau 7 : indicateurs statistiques des relations Surface Volume sur les lacs A et B	36
Tableau 8 indicateurs statistiques des relations Surface Volume sur le lac B en fonction du type de données utilisées.....	37
Tableau 9 : Indicateurs statistiques des relations Hauteur Volume sur le lac B en fonction du type de données utilisées	39
Tableau 10 : Estimation des variations de volume à partir des données satellitaires sur le lac de la Bure et le lac de Sainte Foy	40
Tableau 11 : Seuils de confiance des estimations de volumes réalisées à partir des données satellitaires	42
Tableau 12 : Indicateurs statistiques sur les estimations de volume CHR et Altimétrique, lac de la Bure 2010.....	42
Tableau 13 : Comparaisons des sensibilités de chacune des techniques satellitaires en fonction de l'état de remplissage du lac.	45
Tableau 14 : Comparaisons des différentes phases de remplissage et de vidange mesurées par satellites sur la période 2003-2010.....	46
Tableau 15 : Détail chiffré de chaque cycle annuel sur la période 2003-2010 avec à gauche les données de surface et à droite les données de hauteur.	46
Tableau 16.....	49

RESUME

Apport des données satellites radar (SAR - Altimètre) pour la gestion des stocks d'eau en zone agricole irriguée.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Paris 2013

RESUME

Cette étude vise à étendre le champ d'action de l'altimétrie radar à de petites surfaces d'eau (< 100 hectares) continentales en milieu fortement hétérogène, puis dans un second temps de réaliser des estimations de volume à partir de données satellitaires (SAR et Altimètres combinés). Pour réaliser cette étude, nous disposons d'un ensemble de données SAR haute résolution (>80 image en 2010), de mesures altimétriques régulières (période 2002 2010), de données terrains concernant la gestion et le fonctionnement de plusieurs retenues d'eau (abaques, mesures de volume). Située au sud ouest de la France, la zone d'étude s'intègre dans un projet plus vaste appelé « Sud Ouest ». Les premiers résultats ont montré une réelle capacité de l'altimétrie radar à mesurer des hauteurs d'eau sur de très petits lacs puis en association aux mesures SAR HR à estimer des variations de volume.

Mots clés : Hauteur d'eau, lac de petite taille, Altimétrie radar, SAR, Projet Sud-ouest

Abstract

This study aims are to extend altimetry radar applications to small lakes (<100 hectares) then to realize volume estimation of water resources based on combined use of SAR and Altimetry data. To complete this study, an area already used by the CESBIO located in the South West of France has been chosen. Remote sensing data (> 80 high resolution images in 2010) are provided by three low orbit satellites and by RA-2 altimeter since 2002 to the end of 2010. Ground data are collected to Lake Manager over the same period. Results show a reel capacity to observe water level of small lakes in altimetry signal and possibility to estimate variations volume with combining to SAR data.

Key-words: Water volume, Small lake, Altimetry, SAR, Project "Sud-ouest"