

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 et Applications*

Nicolas BERCHER

Thèse pour l'obtention du grade de docteur d'AgroParisTech

Mardi 9 décembre 2008



Plan de l'exposé

- 1 Contexte et objectifs de la thèse
- 2 Développement d'une méthode standard de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques
- 3 Applications de la méthode : qualité de produits existants et incertitude des mesures altimétriques
- 4 Conclusion et perspectives

- 1 Contexte et objectifs de la thèse
 - Introduction à l'altimétrie radar nadir
 - Adaptation pour le suivi du niveau des cours d'eau
 - Objectifs de la thèse
- 2 Développement d'une méthode standard de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques
- 3 Applications de la méthode : qualité de produits existants et incertitude des mesures altimétriques
- 4 Conclusion et perspectives

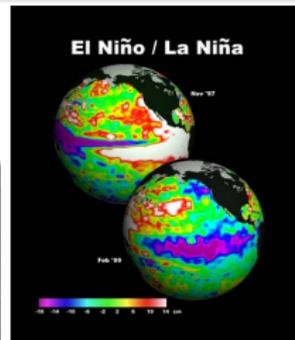
Des missions altimétriques pour le suivi des océans

20 années d'altimétrie radar



Océanographie

- Suivi global du niveau des océans : topographie de surface, courants marins, évolution
- Analyse de phénomènes régionaux : El Niño/La Niña



Des missions altimétriques pour le suivi des océans

20 années d'altimétrie radar



Mesure spatialisée du
niveau des océans

Adaptation aux eaux continentales : un enjeu

- **Applications** : Mers intérieures, lacs, plaines d'inondations, fleuves
- **Intérêt majeur** : suivi **global** et en **temps réel** de la **composante continentale du cycle de l'eau**
- **Difficultés** :
 - Technique optimisée pour les océans
 - Problème d'échantillonnage spatio-temporel
 - Précision ?

Points forts et points faibles de l'altimétrie radar

Points forts

Points faibles

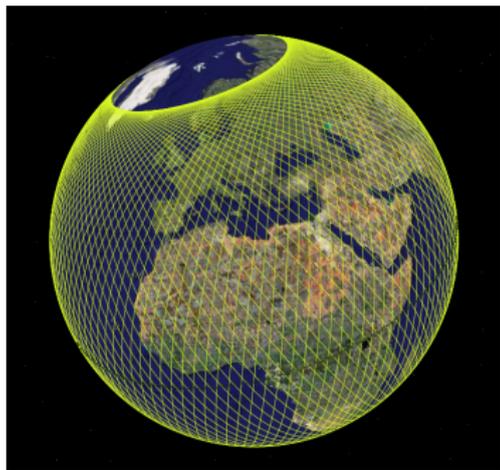
Points forts et points faibles de l'altimétrie radar

Points forts

- Couverture quasi-globale

Points faibles

Ex : orbite Topex/Poseidon



Périodicité 10 jours

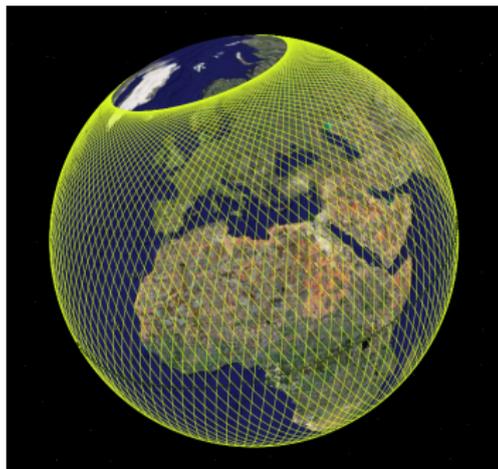
Points forts et points faibles de l'altimétrie radar

Points forts

- Couverture quasi-globale
- Mesures homogènes (même capteur et référentiel)

Points faibles

Ex : orbite Topex/Poseidon



Périodicité 10 jours

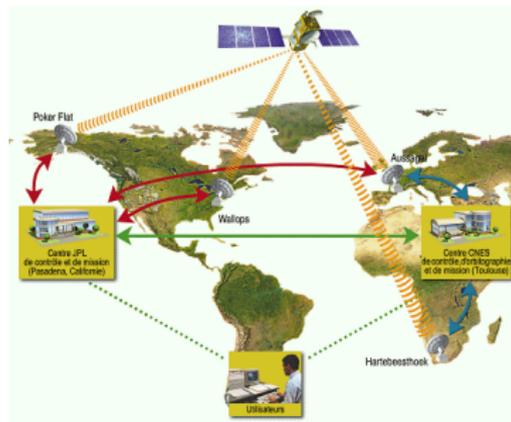
Points forts et points faibles de l'altimétrie radar

Points forts

- Couverture quasi-globale
- Mesures homogènes (même capteur et référentiel)
- Mesures disponibles rapidement

Points faibles

Traitement des données



Quelques jours à quelques semaines...

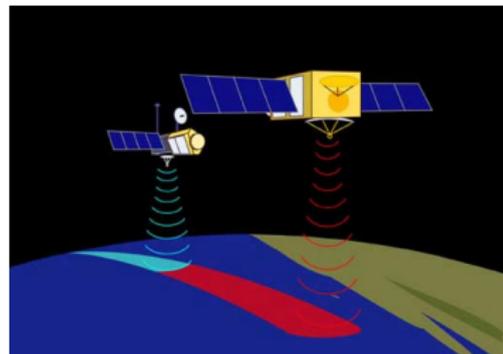
Points forts et points faibles de l'altimétrie radar

Points forts

- Couverture quasi-globale
- Mesures homogènes (même capteur et référentiel)
- Mesures disponibles rapidement
- Continuité des données assurée

Points faibles

Missions présentes et futures



ESA : ERS-1, ERS-2,
ENVISAT, ...

CNES/NASA : T/P, Jason-1,
Jason-2, Jason-3, ...

Points forts et points faibles de l'altimétrie radar

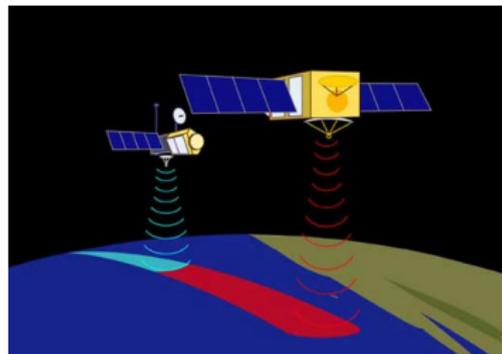
Points forts

- Couverture quasi-globale
- Mesures homogènes (même capteur et référentiel)
- Mesures disponibles rapidement
- Continuité des données assurée

Points faibles

- Profileur (trace) \neq imageur (fauchée)
- Non-optimisé en continental

Missions présentes et futures



ESA : ERS-1, ERS-2,
ENVISAT, ...

CNES/NASA : T/P, Jason-1,
Jason-2, Jason-3, ...

Points forts et points faibles de l'altimétrie radar

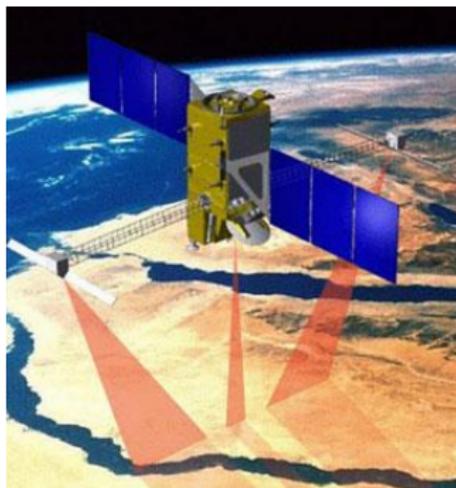
Points forts

- Couverture quasi-globale
- Mesures homogènes (même capteur et référentiel)
- Mesures disponibles rapidement
- Continuité des données assurée

Points faibles

- Profileur (trace) \neq imageur (fauchée)
- Non-optimisé en continental

SWOT : radars interférométrique et nadir



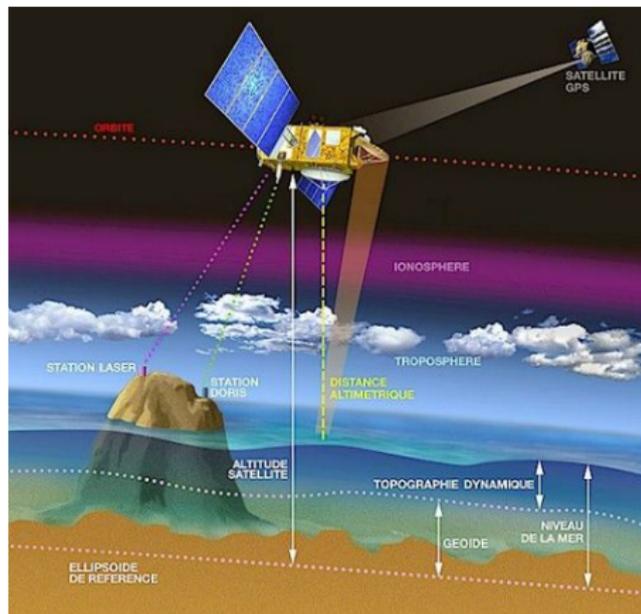
⇒ Améliorations à venir :
Jason-2 (retracking), LiDAR,
SWOT (IMAGEUR)

Principe de la mesure radar au nadir (1)

Mesure de la distance satellite-surface

Instruments embarqués

- Positionnement
- Altimètre
- Radiomètre



Principe de la mesure radar au nadir (1)

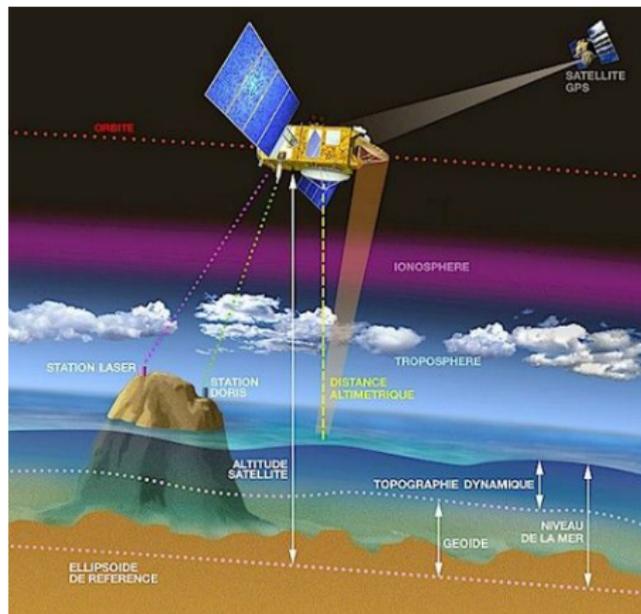
Mesure de la distance satellite-surface

Instruments embarqués

- Positionnement
- Altimètre
- Radiomètre

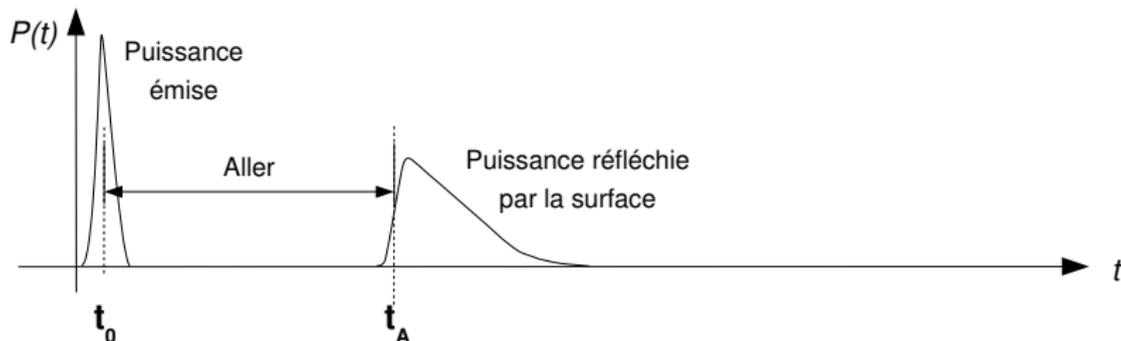
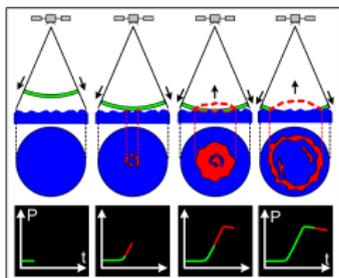
« Positionnement hybride »

- Positionnement GPS
- Détermination d'orbite DORIS
- Télémétrie LASER



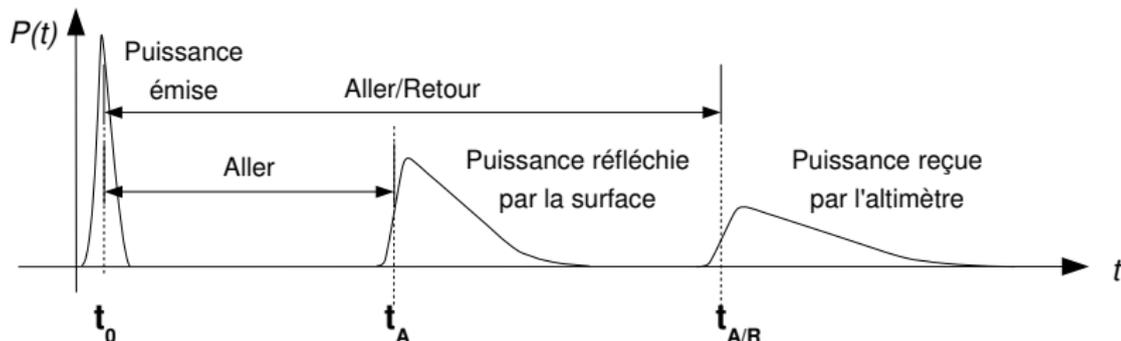
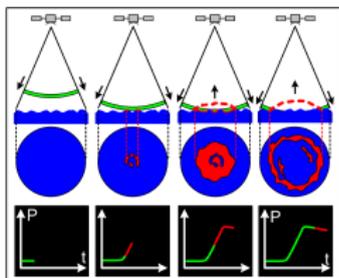
Principe de la mesure radar au nadir (2)

Formation de l'écho radar à la surface des océans



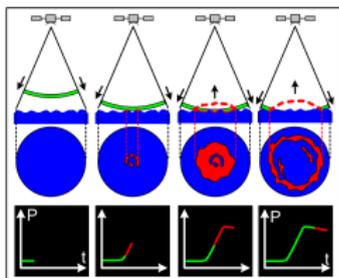
Principe de la mesure radar au nadir (2)

Formation de l'écho radar à la surface des océans

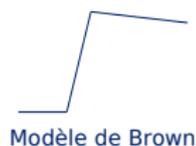


Principe de la mesure radar au nadir (2)

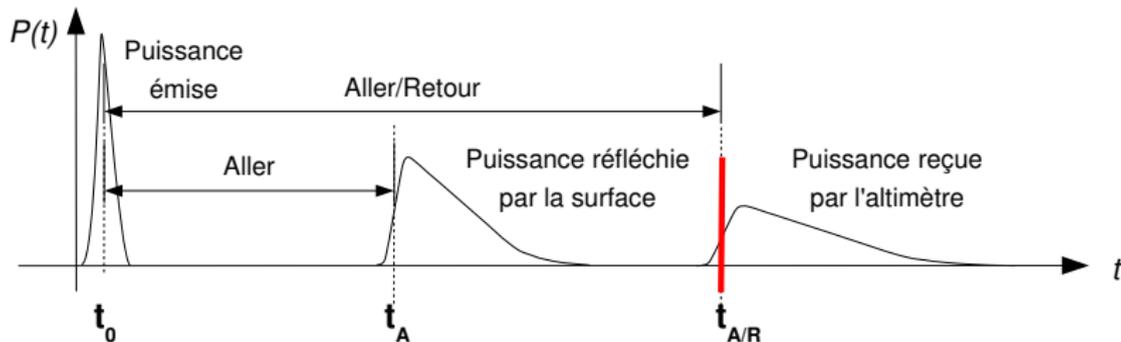
Formation de l'écho radar à la surface des océans



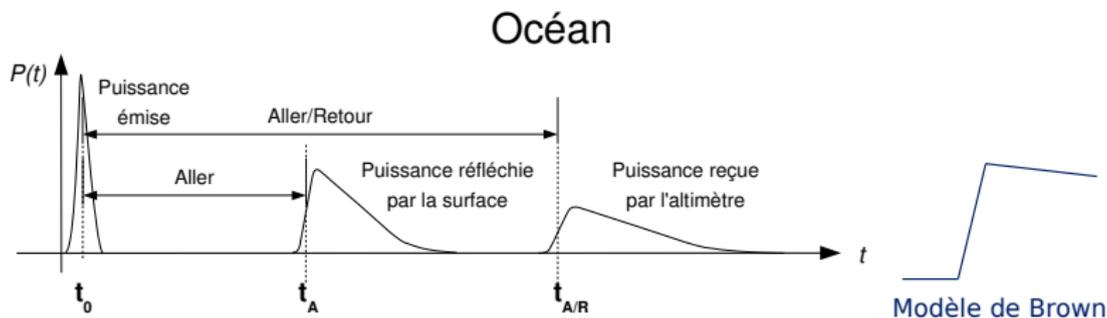
« (re)tracking »



→ Recherche du front de montée (t_{AR})
(hauteur moyenne des vagues)

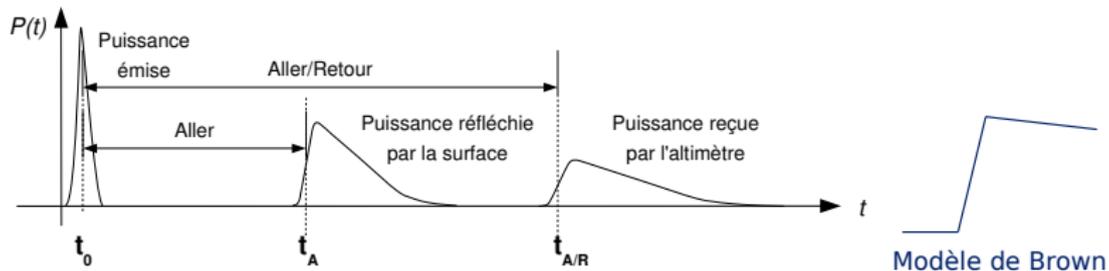


Principe de la mesure radar au nadir (2)

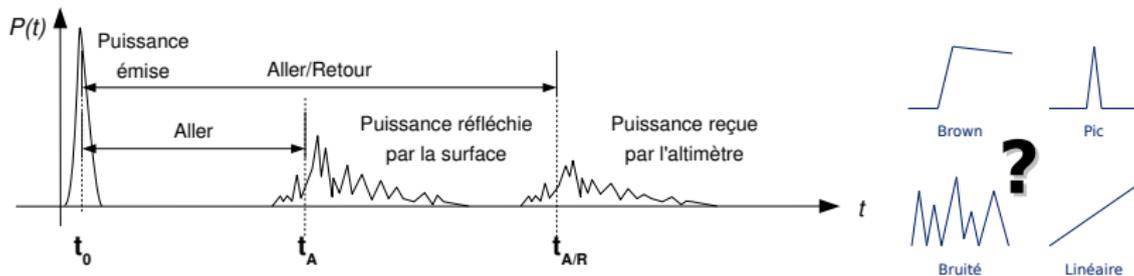


Principe de la mesure radar au nadir (2)

Océan



Continental



Difficultés de mesure sur les cours d'eau

Surface « eaux continentales »

- Surface eau + terre + végétation
- Rétrodiffusion inhomogène et variable dans le temps
- Déformations de surface complexe
- Modèle de forme d'onde inconnu
- Corrections atmosphériques absentes (radiomètre mis en échec)

Océan

- Eau seulement
- Rétrodiffusion « homogène »
- Vagues
- Modèle connu
- Corrections ok

Difficultés de mesure sur les cours d'eau

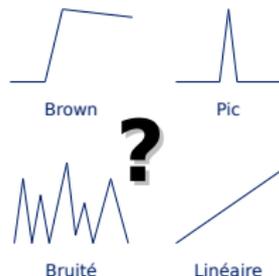
Surface « eaux continentales »

- Surface eau + **terre** + **végétation**
- **Rétrodiffusion inhomogène** et variable dans le temps
- Déformations de **surface complexe**
- Modèle de forme d'onde **inconnu**
- Corrections atmosphériques **absentes** (radiomètre mis en échec)

⇒ **Pas de forme d'onde *a priori* = pas de modèle privilégié : Investigations nécessaires (modèles) [Berry et al., 1997], [Enjolras, 2007]**

Océan

- Eau seulement
- Rétrodiffusion « homogène »
- Vagues
- Modèle connu
- Corrections ok



Généralités sur les produits alti-hydrologiques (1)

Construction d'un produit alti-hydrologique à partir d'une mission altimétrique

Principales étapes

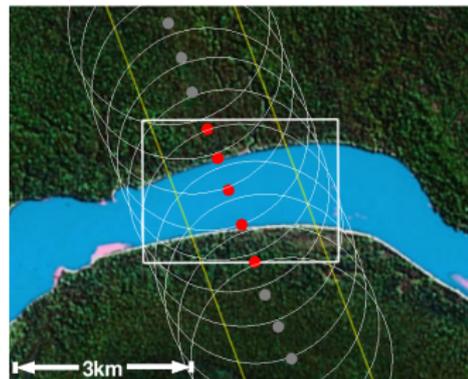
Généralités sur les produits alti-hydrologiques (1)

Construction d'un produit alti-hydrologique à partir d'une mission altimétrique

Principales étapes

- 1 Localisation des mesures : fenêtres géographiques

« Station virtuelle »



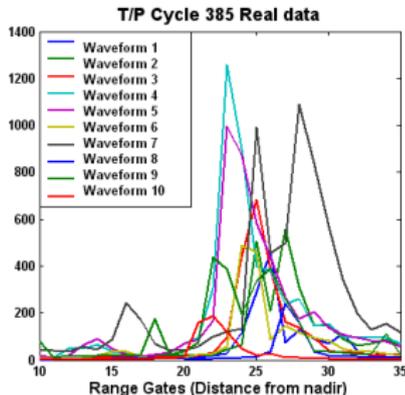
Généralités sur les produits alti-hydrologiques (1)

Construction d'un produit alti-hydrologique à partir d'une mission altimétrique

Principales étapes

- 1 Localisation des mesures : fenêtres géographiques
- 2 Retracking des formes d'onde

Formes d'onde sur la Meuse



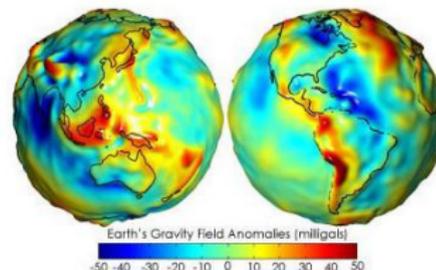
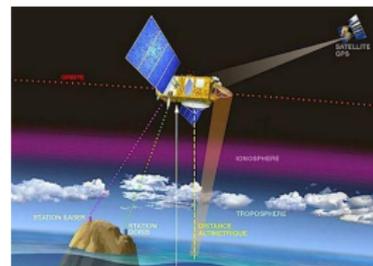
Enjolras et al., Venise 2006

Généralités sur les produits alti-hydrologiques (1)

Construction d'un produit alti-hydrologique à partir d'une mission altimétrique

Principales étapes

- 1 Localisation des mesures : fenêtres géographiques
- 2 Retracking des formes d'onde
- 3 Corrections atmosphériques

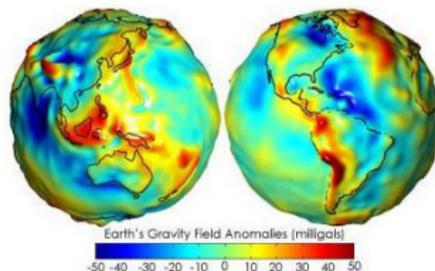
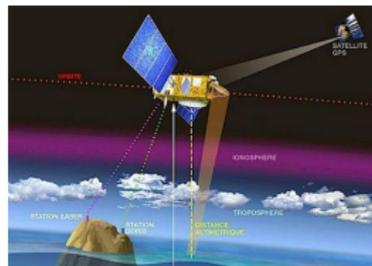


Généralités sur les produits alti-hydrologiques (1)

Construction d'un produit alti-hydrologique à partir d'une mission altimétrique

Principales étapes

- 1 Localisation des mesures : fenêtres géographiques
- 2 Retracking des formes d'onde
- 3 Corrections atmosphériques
- 4 Translation en hauteur orthométrique (géoïde)

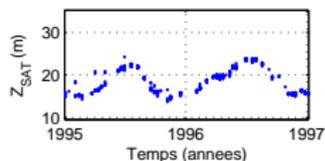
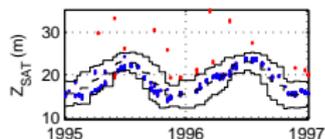
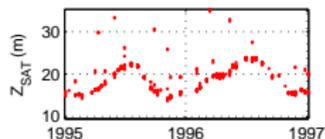


Généralités sur les produits alti-hydrologiques (1)

Construction d'un produit alti-hydrologique à partir d'une mission altimétrique

Principales étapes

- 1 Localisation des mesures : fenêtres géographiques
- 2 Retracking des formes d'onde
- 3 Corrections atmosphériques
- 4 Translation en hauteur orthométrique (géoïde)
- 5 Filtrages des mesures aberrantes



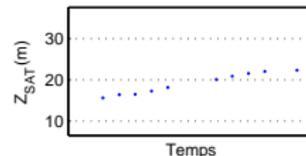
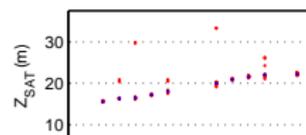
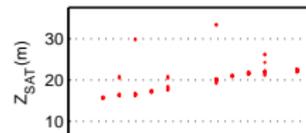
Généralités sur les produits alti-hydrologiques (1)

Construction d'un produit alti-hydrologique à partir d'une mission altimétrique

Principales étapes

- 1 Localisation des mesures : fenêtres géographiques
- 2 Retracking des formes d'onde
- 3 Corrections atmosphériques
- 4 Translation en hauteur orthométrique (géoïde)
- 5 Filtrages des mesures aberrantes
- 6 Sélection d'une mesure représentative par passage

Cohérence hydrologique



Généralités sur les produits alti-hydrologiques (2)

Les produits alti-hydrologiques existants

HydroWeb

Réservoirs, plaines d'inondation,
lacs et cours d'eau

<http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/>

River & Lake Hydrology

Lacs et cours d'eau

<http://earth.esa.int/riverandlake/>

CASH

Cours d'eau

<http://ocean.cls.fr/cash/>

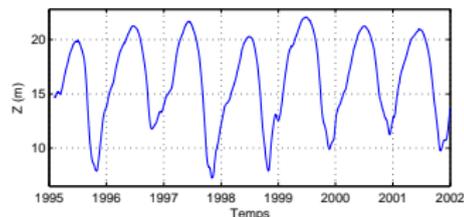
Fleuves et Lacs du Monde Hauteur d'eau par Altimétrie



Site internet HydroWeb

Utilisation des séries temporelles de niveau $Z(t)$ par les hydrologues

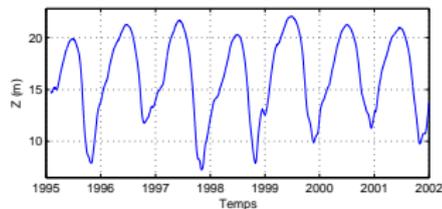
- Estimation des ressources en eau :
 - Suivi de volume des réservoirs
 - Estimation des débits
 $Z(t) \rightarrow Q(t)$
- Analyse statistique des niveaux de crue (dimensionnement d'ouvrages de protection)
- Gestion des ressources en eau (réservoirs et cours d'eau)
- Étude et préservation des milieux aquatiques



Qualité des produits alti-hydrologiques ... ?



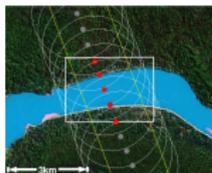
Produit limnimétrique



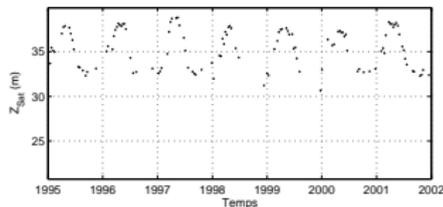
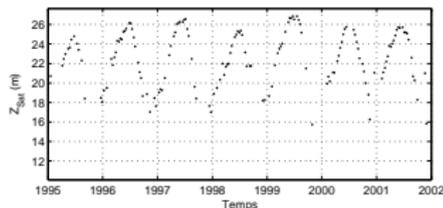
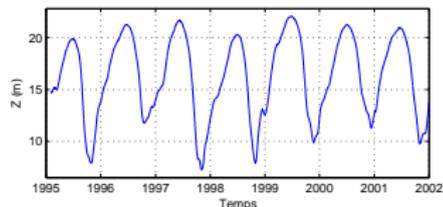
Qualité des produits alti-hydrologiques ... ?



Produit limnimétrique



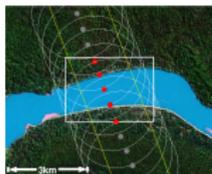
Produit alti-hydrologique



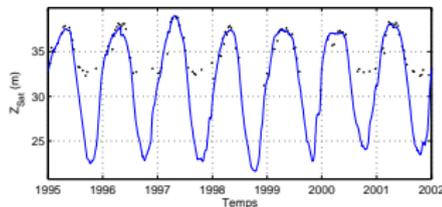
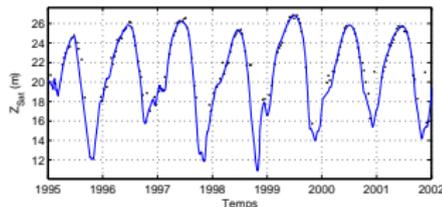
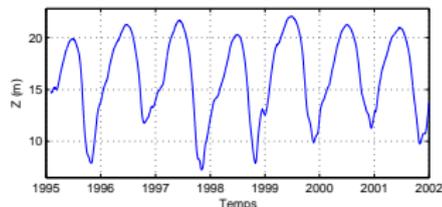
Qualité des produits alti-hydrologiques ... ?



Produit limnimétrique



Produit alti-hydrologique



« *Quelle est la qualité des produits alti-hydrologiques ?* »

Qualité des produits alti-hydrologiques ... ?

« Quelle est la qualité des produits alti-hydrologiques ? »

Qualité des produits alti-hydrologiques ... ?

« *Quelle est la qualité des produits alti-hydrologiques ?* »

Constat actuel sur la connaissance de la qualité

- Très bien connue sur les océans, mers intérieures et lacs
- **Qualité sur les cours d'eau :**
 - Définition de la « qualité » ?
 - Période d'échantillonnage effective non prise en compte
 - Quelques travaux [Birkett et al., 2002], [Cauhapé et al., 2006]
 - Pas de cadre méthodologique
 - **Pas de méthode standard**

Qualité des produits alti-hydrologiques ... ?

« *Quelle est la qualité des produits alti-hydrologiques ?* »

Constat actuel sur la connaissance de la qualité

- Très bien connue sur les océans, mers intérieures et lacs
- **Qualité sur les cours d'eau :**
 - Définition de la « qualité » ?
 - Période d'échantillonnage effective non prise en compte
 - Quelques travaux [Birkett et al., 2002], [Cauhapé et al., 2006]
 - Pas de cadre méthodologique
 - **Pas de méthode standard**

⇒ « **Zone de flou autour de la qualité** » : a pénalisé
l'exploitation opérationnelle des produits alti-hydrologiques

Objectifs de la thèse

Objectifs de la thèse

Objectifs

**Développer une Méthode Standard de Quantification de la
Qualité des Produits Alti-Hydrologiques**

Objectifs de la thèse

Objectifs

Développer une Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques

→ Analyser les **déterminants** de l'erreur de mesure

Objectifs de la thèse

Objectifs

Développer une Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques

- Analyser les **déterminants** de l'erreur de mesure
- Associer des **valeurs d'incertitude** aux mesures altimétriques du niveau des cours d'eau

Objectifs de la thèse

Objectifs

Développer une Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques

- Analyser les **déterminants** de l'erreur de mesure
- Associer des **valeurs d'incertitude** aux mesures altimétriques du niveau des cours d'eau

Enjeux

- **Altimétrie radar** : Guider et valider l'**amélioration progressive des produits**
- **Hydrologie** : Pouvoir utiliser les produits en pleine **connaissance de leur qualité**

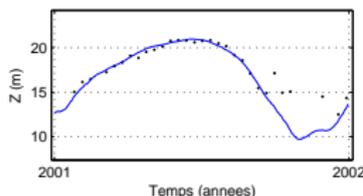
- 1 Contexte et objectifs de la thèse
- 2 Développement d'une méthode standard de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques
 - Définitions
 - Bases de la méthode
 - Calcul des indicateurs de qualité pour une station virtuelle
 - Qualité d'un produit alti-hydrologique
- 3 Applications de la méthode : qualité de produits existants et incertitude des mesures altimétriques
- 4 Conclusion et perspectives

Deux concepts de « qualité »

Qualité « altimétrique »

« Aptitude du système altimétrique à **mesurer le niveau des cours d'eau** dans différentes configurations »

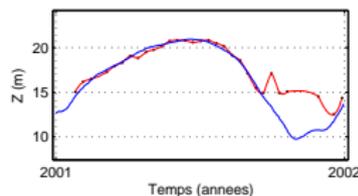
⇒ **Perte et Précision** des mesures



Qualité « hydrologique »

« Aptitude, à partir d'un produit altimétrique, à **reconstituer le signal hydrologique** »

⇒ **Précision et Adéquation** de l'échantillonnage temporel

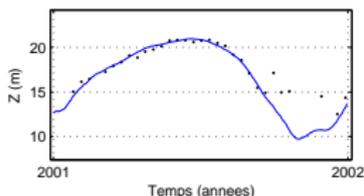


Deux concepts de « qualité »

Qualité « altimétrique »

« Aptitude du système altimétrique à **mesurer le niveau des cours d'eau** dans différentes configurations »

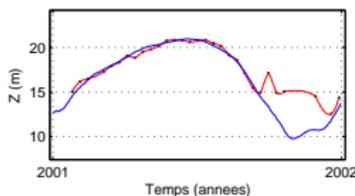
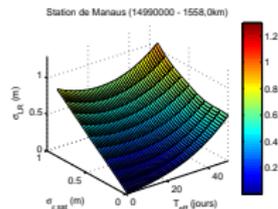
⇒ **Perte et Précision** des mesures



Qualité « hydrologique »

« Aptitude, à partir d'un produit alti-hydrologique, à **reconstituer le signal hydrologique** »

⇒ **Précision et Adéquation** de l'échantillonnage temporel



« Précision » : Un problème de vocabulaire. . .

Remarques sur les termes « **précision** » et « **incertitude** »

Mot « Précision »

Sens commun : « Quelle est la *précision* du produit ? »

Larousse : « Qualité globale d'une mesure [...] »

Norme ISO : **Terme proscrit !**

« Précision » : Un problème de vocabulaire. . .

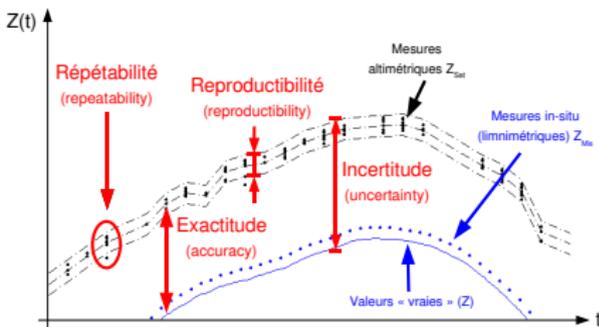
Remarques sur les termes « **précision** » et « **incertitude** »

Mot « Précision »

Sens commun : « Quelle est la *précision* du produit ? »

Larousse : « Qualité globale d'une mesure [...] »

Norme ISO : **Terme proscrit !**



Termes de la norme ISO (1993) [AFNOR, 1994]

Vocabulaire International de Métrologie, NF X07-001

« Précision » : Un problème de vocabulaire. . .

Remarques sur les termes « **précision** » et « **incertitude** »

Mot « Précision »

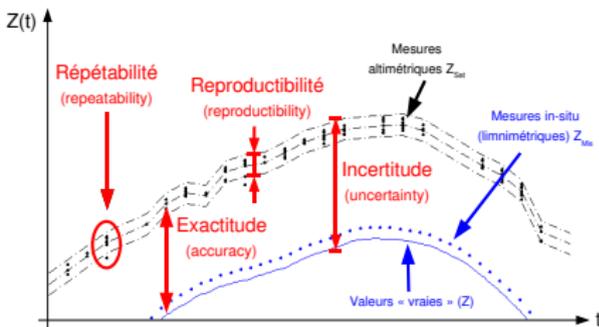
Sens commun : « Quelle est la *précision* du produit ? »

Larousse : « Qualité globale d'une mesure [...] »

Norme ISO : **Terme proscrit !**

Erreur de mesure :

Composantes **aléatoire** et **systématique** (à déterminer)



Termes de la norme ISO (1993) [AFNOR, 1994]

Vocabulaire International de Métrologie, NF X07-001

« Précision » : Un problème de vocabulaire. . .

Remarques sur les termes « **précision** » et « **incertitude** »

Mot « Précision »

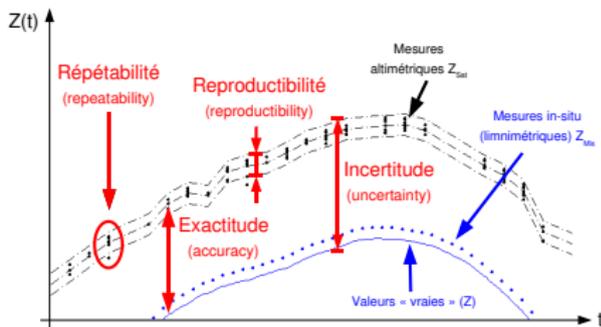
Sens commun : « Quelle est la *précision* du produit ? »

Larousse : « Qualité globale d'une mesure [...] »

Norme ISO : **Terme proscrit !**

Erreur de mesure :

Composantes **aléatoire** et **systématique** (à déterminer)



Termes de la norme ISO (1993) [AFNOR, 1994]

Vocabulaire International de Métrologie, NF X07-001

Sens du mot « précision » dans le cadre de la THÈSE

Précision = err. syst. + reproductibilité : $Z_{Sat} \in [Z + \text{Err. Sys.} \pm \text{Reprod.}]$

Incertitude : $Z \in [Z_{Sat} + \text{Err. Sys.} \pm \text{Reprod.}]$

Qualité d'une série temporelle alti-hydrologique

Comparaison entre mesures altimétriques et mesures in-situ → erreur de mesure ε_{Sat}

Indicateurs de précision des mesures altimétriques

- $\mu_{\varepsilon_{Sat}}$: Moyenne de l'erreur
- $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$: Écart-type de l'erreur
- $RMS_{\varepsilon_{Sat}}$: RMS (Erreur Quadratique Moyenne)

Indicateurs d'échantillonnage des mesures altimétriques

- T_{eff} : Période d'échantillonnage effective (moyenne)
- η_{eff} : Taux de pertes de mesures (indépendant de T_{eff})

Bases de la méthode

Deux phases

- 1 Quantification de la qualité d'un produit sur une station virtuelle
 - Confrontation entre mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées
 - Analyse de la série temporelle de l'erreur
 - Construction d'indicateurs de qualité

Bases de la méthode

Deux phases

- 1 Quantification de la qualité d'un produit sur une station virtuelle
 - Confrontation entre mesures altimétriques et mesures in-situ reconstituées
 - Analyse de la série temporelle de l'erreur
 - Construction d'indicateurs de qualité
- 2 Application à un grand nombre de stations virtuelles (statistiquement significatif)
 - Choix d'un réseau hydrographique pilote : **bassin amazonien**
 - ≥ 40 stations virtuelles (100 idéalement)
 - Diversité de largeurs de cours d'eau (500m à 3km et plus)

Bases de la méthode

Formalisation des bilans d'erreur

- Idéalement : $\varepsilon_{Sat}(t_n) = Z_{Sat}(t_n) - Z(t_n)$
- $Z_{Ris}(t_n)$ estimation de $Z(t_n)$ reconstituée à partir des mesures in-situ $Z_{Mis}(t_n)$
- $\tilde{\varepsilon}_{Sat} = Z_{Sat} - Z_{Ris}$
- $$\begin{aligned}\varepsilon_{Sat} &= (Z_{Sat} - Z_{Ris}) + (Z_{Ris} - Z_{Mis}) + (Z_{Mis} - Z) \\ &= \tilde{\varepsilon}_{Sat} + \varepsilon_{Rec} + \varepsilon_{Mis}\end{aligned}$$
- $$\begin{cases} \mu_{\varepsilon_{Sat}} = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}} \\ \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 \approx \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \end{cases}$$

Bases de la méthode

Formalisation des bilans d'erreur

- Idéalement : $\varepsilon_{Sat}(t_n) = Z_{Sat}(t_n) - Z(t_n)$
- $Z_{Ris}(t_n)$ estimation de $Z(t_n)$ reconstituée à partir des mesures in-situ $Z_{Mis}(t_n)$
- $\tilde{\varepsilon}_{Sat} = Z_{Sat} - Z_{Ris}$
- $$\begin{aligned}\varepsilon_{Sat} &= (Z_{Sat} - Z_{Ris}) + (Z_{Ris} - Z_{Mis}) + (Z_{Mis} - Z) \\ &= \tilde{\varepsilon}_{Sat} + \varepsilon_{Rec} + \varepsilon_{Mis}\end{aligned}$$
- $$\begin{cases} \mu_{\varepsilon_{Sat}} = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}} \\ \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 \approx \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \end{cases}$$

Méthode en 6 étapes

- 1 Reconstitution
- 2 Série d'erreur
- 3 Indic. $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$
- 4 Indic. ε_{Mis}
- 5 Indic. ε_{Rec}
- 6 Indic. Qualité

Bases de la méthode

Formalisation des bilans d'erreur

- Idéalement : $\varepsilon_{Sat}(t_n) = Z_{Sat}(t_n) - Z(t_n)$
- $Z_{Ris}(t_n)$ estimation de $Z(t_n)$ reconstituée à partir des mesures in-situ $Z_{Mis}(t_n)$
- $\tilde{\varepsilon}_{Sat} = Z_{Sat} - Z_{Ris}$
- $$\begin{aligned}\varepsilon_{Sat} &= (Z_{Sat} - Z_{Ris}) + (Z_{Ris} - Z_{Mis}) + (Z_{Mis} - Z) \\ &= \tilde{\varepsilon}_{Sat} + \varepsilon_{Rec} + \varepsilon_{Mis}\end{aligned}$$
- $$\begin{cases} \mu_{\varepsilon_{Sat}} = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}} \\ \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 \approx \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \end{cases}$$

Méthode en 6 étapes

- 1 Reconstitution
- 2 Série d'erreur
- 3 Indic. $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$
- 4 Indic. ε_{Mis}
- 5 Indic. ε_{Rec}
- 6 Indic. Qualité

Bases de la méthode

Formalisation des bilans d'erreur

- Idéalement : $\varepsilon_{Sat}(t_n) = Z_{Sat}(t_n) - Z(t_n)$
- $Z_{Ris}(t_n)$ estimation de $Z(t_n)$ reconstituée à partir des mesures in-situ $Z_{Mis}(t_n)$
- $\tilde{\varepsilon}_{Sat} = Z_{Sat} - Z_{Ris}$
- - $\varepsilon_{Sat} = (Z_{Sat} - Z_{Ris}) + (Z_{Ris} - Z_{Mis}) + (Z_{Mis} - Z)$
 - $= \tilde{\varepsilon}_{Sat} + \varepsilon_{Rec} + \varepsilon_{Mis}$
- $$\begin{cases} \mu_{\varepsilon_{Sat}} = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}} \\ \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 \approx \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \end{cases}$$

Méthode en 6 étapes

- 1 Reconstitution
- 2 Série d'erreur
- 3 Indic. $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$
- 4 Indic. ε_{Mis}
- 5 Indic. ε_{Rec}
- 6 Indic. Qualité

Bases de la méthode

Formalisation des bilans d'erreur

- Idéalement : $\varepsilon_{Sat}(t_n) = Z_{Sat}(t_n) - Z(t_n)$
- $Z_{Ris}(t_n)$ estimation de $Z(t_n)$ reconstituée à partir des mesures in-situ $Z_{Mis}(t_n)$
- $\tilde{\varepsilon}_{Sat} = Z_{Sat} - Z_{Ris}$
- - $\varepsilon_{Sat} = (Z_{Sat} - Z_{Ris}) + (Z_{Ris} - Z_{Mis}) + (Z_{Mis} - Z)$
 $= \tilde{\varepsilon}_{Sat} + \varepsilon_{Rec} + \varepsilon_{Mis}$
- $$\begin{cases} \mu_{\varepsilon_{Sat}} = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}} \\ \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 \approx \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \end{cases}$$

Méthode en 6 étapes

- 1 Reconstitution
- 2 Série d'erreur
- 3 Indic. $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$
- 4 Indic. ε_{Mis}
- 5 Indic. ε_{Rec}
- 6 Indic. Qualité

Bases de la méthode

Formalisation des bilans d'erreur

- Idéalement : $\varepsilon_{Sat}(t_n) = Z_{Sat}(t_n) - Z(t_n)$
- $Z_{Ris}(t_n)$ estimation de $Z(t_n)$ reconstituée à partir des mesures in-situ $Z_{Mis}(t_n)$
- $\tilde{\varepsilon}_{Sat} = Z_{Sat} - Z_{Ris}$
- - $\varepsilon_{Sat} = (Z_{Sat} - Z_{Ris}) + (Z_{Ris} - Z_{Mis}) + (Z_{Mis} - Z)$
 $= \tilde{\varepsilon}_{Sat} + \varepsilon_{Rec} + \varepsilon_{Mis}$
- $$\begin{cases} \mu_{\varepsilon_{Sat}} = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}} \\ \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 \approx \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \end{cases}$$

Méthode en 6 étapes

- 1 Reconstitution
- 2 Série d'erreur
- 3 Indic. $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$
- 4 Indic. ε_{Mis}
- 5 Indic. ε_{Rec}
- 6 Indic. Qualité

Bases de la méthode

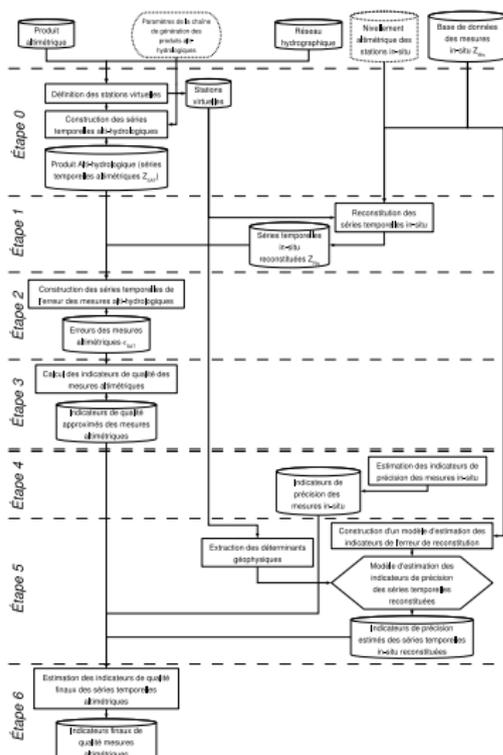
Formalisation des bilans d'erreur

- Idéalement : $\varepsilon_{Sat}(t_n) = Z_{Sat}(t_n) - Z(t_n)$
- $Z_{Ris}(t_n)$ estimation de $Z(t_n)$ reconstituée à partir des mesures in-situ $Z_{Mis}(t_n)$
- $\tilde{\varepsilon}_{Sat} = Z_{Sat} - Z_{Ris}$
- - $\varepsilon_{Sat} = (Z_{Sat} - Z_{Ris}) + (Z_{Ris} - Z_{Mis}) + (Z_{Mis} - Z)$
 $= \tilde{\varepsilon}_{Sat} + \varepsilon_{Rec} + \varepsilon_{Mis}$
- $$\begin{cases} \mu_{\varepsilon_{Sat}} &= \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}} \\ \sigma_{\varepsilon_{Sat}}^2 &\approx \sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Rec}}^2 - \sigma_{\varepsilon_{Mis}}^2 \end{cases}$$

Méthode en 6 étapes

- 1 Reconstitution
- 2 Série d'erreur
- 3 Indic. $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$
- 4 Indic. ε_{Mis}
- 5 Indic. ε_{Rec}
- 6 **Indic. Qualité**

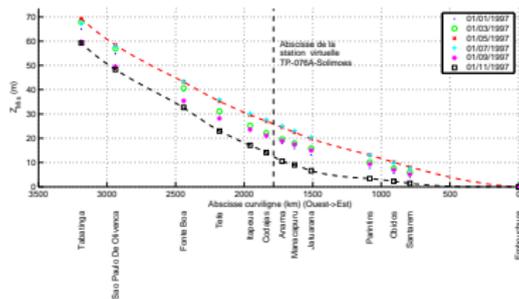
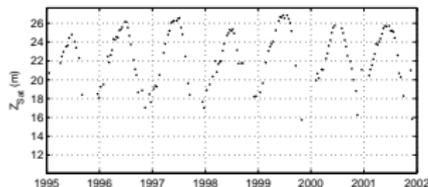
Bases de la méthode



Méthode en 6 étapes

- 1 Reconstitution
- 2 Série d'erreur
- 3 Indic. $\tilde{\epsilon}_{Sat}$
- 4 Indic. ϵ_{Mis}
- 5 Indic. ϵ_{Rec}
- 6 Indic. Qualité

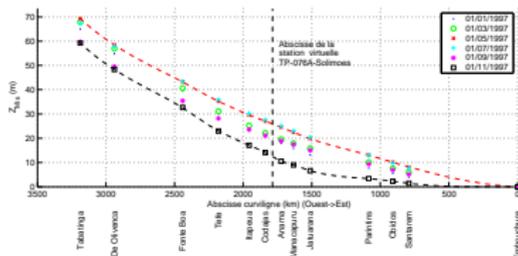
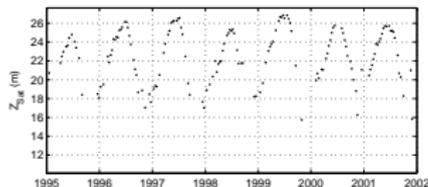
Étape 1 : Reconstitution de Z_{Ris} à partir de stations amont et aval



Méthodes de reconstitution

- Modélisation hydrodynamique (équations de Saint-Venant)
- Modélisation conceptuelle (fonctions de transfert)
- Méthodes d'interpolation

Étape 1 : Reconstitution de Z_{Ris} à partir de stations amont et aval



Méthodes de reconstitution

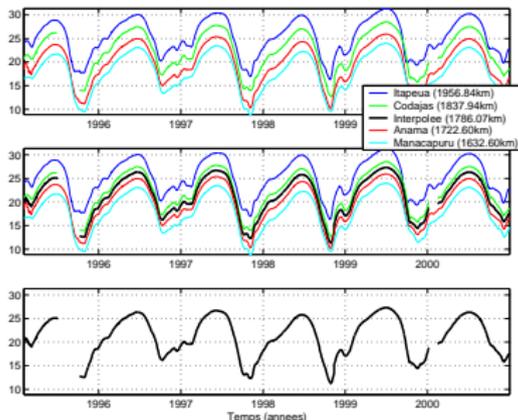
- Modélisation hydrodynamique (équations de Saint-Venant)
- Modélisation conceptuelle (fonctions de transfert)
- Méthodes d'interpolation

Solution adoptée (fleuves de plaine)

- Profil longitudinal passant par N stations
- Fonction polynomiale de degré N à « énergie minimale » (lissage) :

$$\min \left(\mathcal{E}(t) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \left[\frac{\partial^2 Z(x, t)}{\partial x^2} \right]^2 dx \right)$$
- N+1 paramètres et équations (analytique)
- **Précautions** : éviter les discontinuités (chutes d'eau, confluences fortes. . .)

Étape 1 : Reconstitution de Z_{Ris} à partir de stations amont et aval



Méthodes de reconstitution

- Modélisation hydrodynamique (équations de Saint-Venant)
- Modélisation conceptuelle (fonctions de transfert)
- Méthodes d'interpolation

Solution adoptée (fleuves de plaine)

- Profil longitudinal passant par N stations
- Fonction polynomiale de degré N à « énergie minimale » (lissage) :
$$\min \left(\mathcal{E}(t) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \left[\frac{\partial^2 Z(x, t)}{\partial x^2} \right]^2 dx \right)$$
- N+1 paramètres et équations (analytique)
- **Précautions** : éviter les discontinuités (chutes d'eau, confluences fortes...)

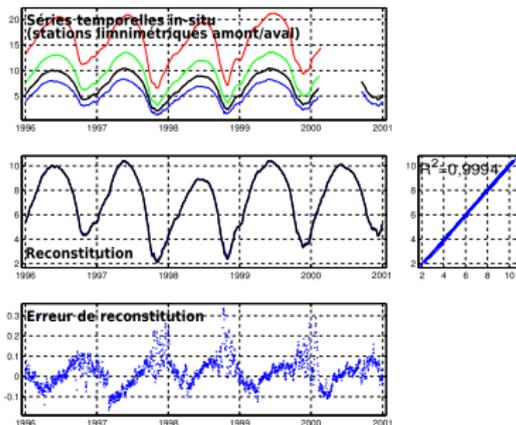
Étape 1 : Quelle est l'erreur introduite par cette reconstitution ?

Modélisation de l'erreur

- Test de la méthode sur des stations limnimétriques :
 - Z_{Mis} connue
 - Z_{Ris} reconstitué (stations amont et aval)
- Combinatoire : 161 configurations réalistes
- Modélisation de ε_{Rec} à partir de déterminants morphologiques et hydrologiques

$$\mu_{\varepsilon_{Rec}} = f(\mathbf{dsppa}, \mathbf{mgd}, \mathbf{acurv}, \mathbf{etdn})$$

$$\sigma_{\varepsilon_{Rec}} = f(\mathbf{dspp}, \mathbf{mgd}, \mathbf{acurv}, \mathbf{etdn})$$



Étape 1 : Quelle est l'erreur introduite par cette reconstitution ?

Résultats de l'estimation (par modélisation) de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$

Analyse des résultats

- $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ **mal estimé pour 3 ou 4 stations**
(configurations de reconstitution très fréquentes)
- $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ passablement bien estimé
($r^2 \geq 0,57$)

Valeurs de r^2

Nb Stat.	$\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$	$\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$
1	0,74	0,57
2	0,46	0,63
3	0,18	0,73
4	0,27	0,59

Conclusion sur les estimations

- ⇒ Moyenne de l'erreur reconstitution $\hat{\mu}_{\varepsilon_{Rec}}$ **non-modélisable**
- ⇒ Écart-type de l'erreur de reconstitution $\hat{\sigma}_{\varepsilon_{Rec}}$ **modélisable**

Étape 2 : Calcul de $\tilde{\varepsilon}_{Sat}$

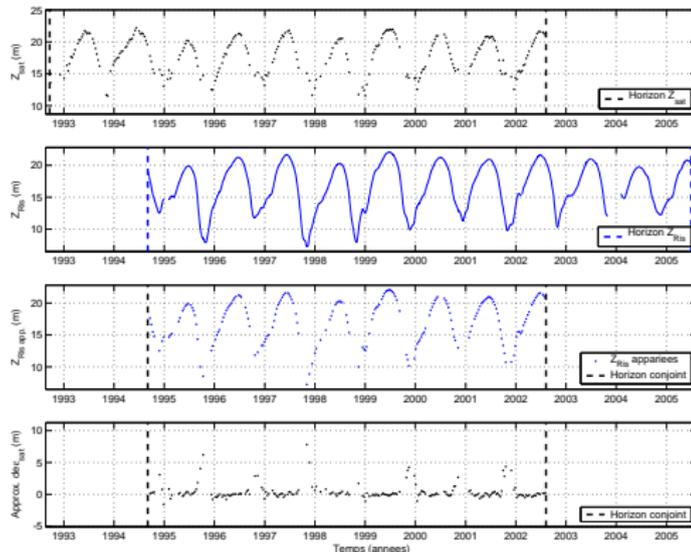
Construction d'une série temporelle de l'erreur des mesures altimétriques

Adéquation temporelle

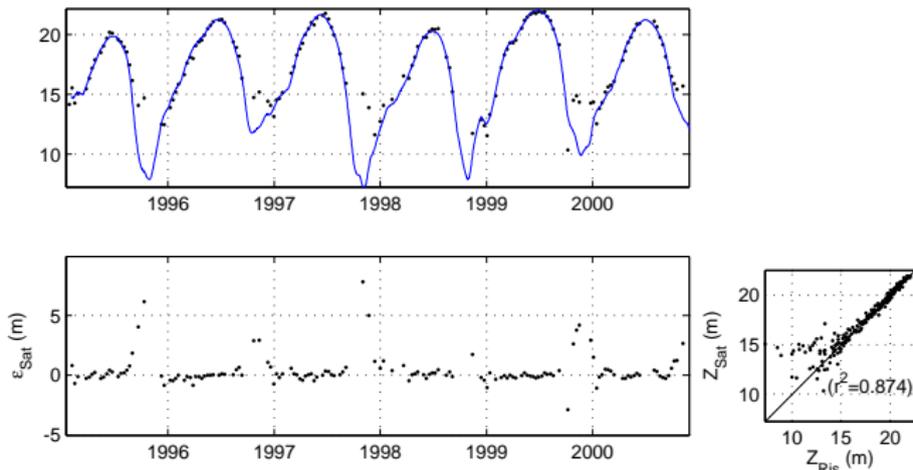
- Travail sur l'horizon temporel conjoint
- Appariement des mesures altimétriques et in-situ reconstituées

Erreur approximée

$$\rightarrow \tilde{\varepsilon}_{Sat} = Z_{Sat} - Z_{Ris}$$



Étape 3 : Calcul de $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (1)

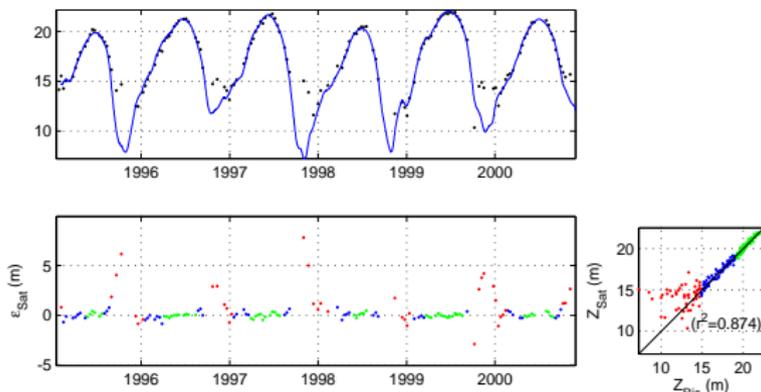


Station virtuelle Topex/Poseidon - Solimões (TP-063A-Solimoes)

	$RMS_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)
Global	1,27	0,08	1,22	14,1	29,6

Étape 3 : Calcul de $\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ et $\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (2)

Déclinaison en fonction des « saisons hydrologiques »



Station virtuelle Topex/Poseidon - Solimões (TP-063A-Solimoes)

	$RMS_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	$\mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	$\sigma_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)
Global	1,27	0,08	1,22	14,1	29,6
H.E.	0,22	-0,28	0,22	11,6	14,3
M.E.	0,34	-0,26	0,34	13,6	26,8
B.E.	2,50	1,15	2,07	19,0	47,7

Étape 5 : Estimation de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$

Résultats de l'estimation (par modélisation) de $\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ et $\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$



Déterminants

dsppa = -49,7km
dspp = 49,7km
mgd = 128,5km
acurv = 1 561,2km
etdn = 0,38m

Modèles

$$\mu_{\varepsilon_{Rec}} = f(\text{dsppa}, \text{mgd}, \text{acurv}, \text{etdn})$$

$$\sigma_{\varepsilon_{Rec}} = f(\text{dspp}, \text{mgd}, \text{acurv}, \text{etdn})$$

Résultats

$$\mu_{\varepsilon_{Rec}} = 0,15\text{m}$$

$$\sigma_{\varepsilon_{Rec}} = 0,27\text{m}$$

Étape 6 : Indicateurs de qualité finaux estimés (1)

Problème sur le biais systématique

- Indicateurs intermédiaires indéterminés :

$$\mu_{\varepsilon Sat} = \mu_{\tilde{\varepsilon} Sat} + \mu_{\varepsilon Rec} + \mu_{\varepsilon Mis}$$

⇒ Adaptation de la méthode...

Étape 6 : Indicateurs de qualité finaux estimés (1)

Problème sur le biais systématique

- Indicateurs intermédiaires indéterminés :

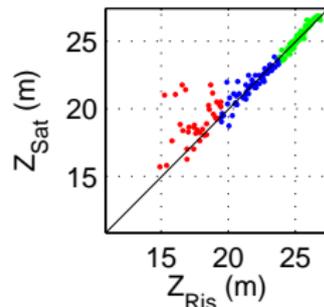
$$\mu_{\varepsilon_{Sat}} = \mu_{\tilde{\varepsilon}_{Sat}} + \mu_{\varepsilon_{Rec}} + \mu_{\varepsilon_{Mis}}$$

⇒ Adaptation de la méthode...

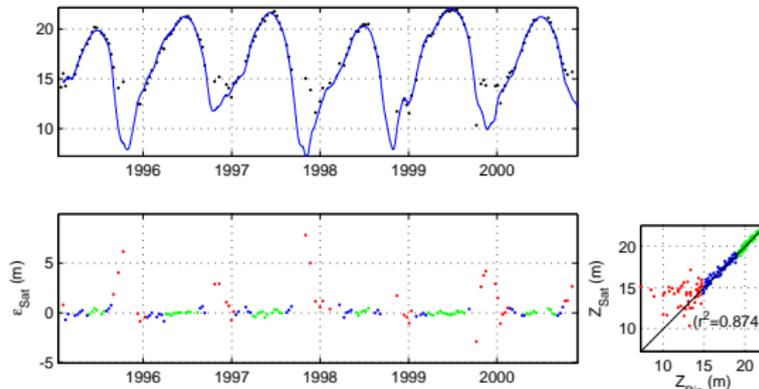
Biais systématique de hautes eaux

- Estimer puis retrancher le biais systématique de hautes eaux

⇒ Quantification de la « **précision relative** »
(annulation du terme d'exactitude)



Étape 6 : Indicateurs de qualité finaux estimés (2)



Station virtuelle Topex/Poseidon - Solimões (TP-063A-Solimoes)

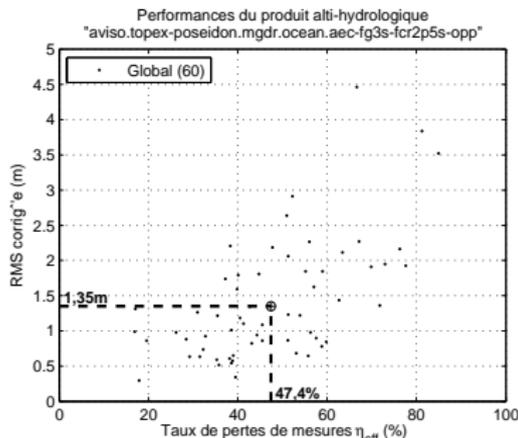
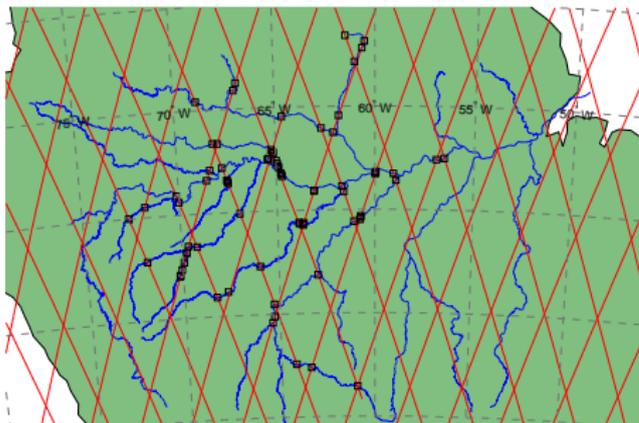
	$\widehat{RMS}_{\varepsilon_{Sat}}$ (m)	$\widehat{\mu}_{\varepsilon_{Sat}}$ (m)	$\widehat{\sigma}_{\varepsilon_{Sat}}$ (m)	T_{eff} (jours)	η_{eff} (%)
Global	1,24	0,36	1,19	14,1	29,6
H.E.	0,19	0,00	0,19	11,6	14,3
M.E.	0,29	0,02	0,29	13,6	26,8
B.E.	2,49	1,43	2,05	19,0	47,7

Qualité d'un produit alti-hydrologique

Ensemble de séries temporelles alti-hydrologiques ...

Exemple : produit alti-hydrologique sur 60 stations virtuelles

- Précision : $\widehat{RMS}_\varepsilon = 1,35\text{m}$ ($0,40 \pm 1,27\text{m}$)
- Taux de pertes : $\eta_{\text{eff}} = 47,7\%$ (21,5 jours)



Conclusion sur la méthode

Méthode en 6 étapes

Qualité : *précision* et *échantillonnage temporel*

- Caractériser la qualité d'une série temporelle alti-hydrologique
⇒ « **Précision relative** »
- Application à un grand nombre de séries temporelles alti-hydrologiques
→ Qualité d'un produit alti-hydrologique : carte [RMS ; η_{eff}]
- ⇒ Zone pilote : bassin amazonien mais applicable à d'autres
- ⇒ Potentiel d'application de la méthode...

- 1 Contexte et objectifs de la thèse
- 2 Développement d'une méthode standard de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques
- 3 Applications de la méthode : qualité de produits existants et incertitude des mesures altimétriques
 - Analyse de la qualité des produits alti-hydrologiques
 - Aide à l'optimisation des produits alti-hydrologiques
 - Détermination de l'incertitude des mesures altimétriques
 - De la qualité altimétrique à la qualité hydrologique
- 4 Conclusion et perspectives

Produits alti-hydrologiques analysés durant la thèse

- Produits alti-hydrologiques distribués :
 - 1 CASH/TP : 10 stations virtuelles
 - 2 River & Lake Hydrology/ERS-2 : 43 stations virtuelles
 - 3 River & Lake Hydrology/ENVISAT : 42 stations virtuelles

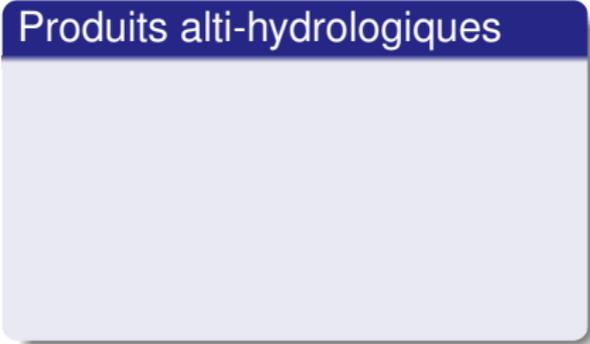
Produits alti-hydrologiques analysés durant la thèse

- Produits alti-hydrologiques distribués :
 - 1 CASH/TP : 10 stations virtuelles
 - 2 River & Lake Hydrology/ERS-2 : 43 stations virtuelles
 - 3 River & Lake Hydrology/ENVISAT : 42 stations virtuelles
- Produits alti-hydrologiques générés dans le cadre de la thèse (analyse des éléments de la chaîne de traitement)
 - Topex/Poseidon sur 77 stations virtuelles
 - 7 chaînes de filtrage différentes, appliquées à 6 (re)trackers :
 - AVISO/M-GDR : tracker Ocean
 - CLS : retrackers Ice1, Ice2, Ocean, Sealce et « clsmix »

Exemples d'analyses de la qualité : résultats bruts

Comparaison brute : fleuves et nombre de stations virtuelles différents

Produits alti-hydrologiques

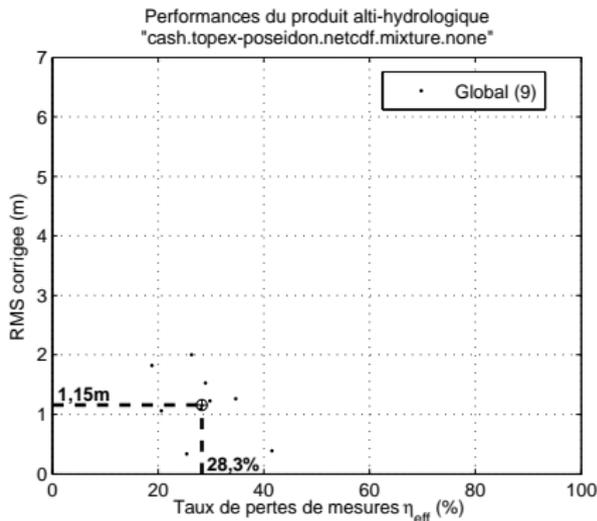


Exemples d'analyses de la qualité : résultats bruts

Comparaison brute : fleuves et nombre de stations virtuelles différents

Produits alti-hydrologiques

- **CASH (9) : 1,15m ; 28,3%**

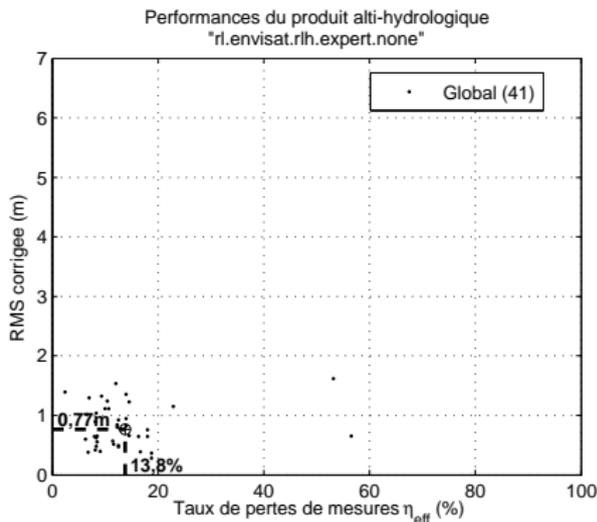


Exemples d'analyses de la qualité : résultats bruts

Comparaison brute : fleuves et nombre de stations virtuelles différents

Produits alti-hydrologiques

- **CASH** (9) : 1,15m ; 28,3%
- **RLH** (41) : 0,77m ; 13,8%

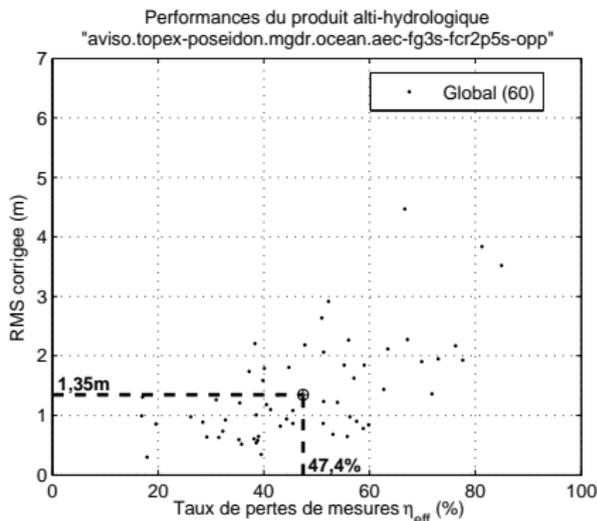


Exemples d'analyses de la qualité : résultats bruts

Comparaison brute : fleuves et nombre de stations virtuelles différents

Produits alti-hydrologiques

- **CASH** (9) : 1,15m ; 28,3%
- **RLH** (41) : 0,77m ; 13,8%
- **AVISO** (60) : 1,35m ; 47,4%

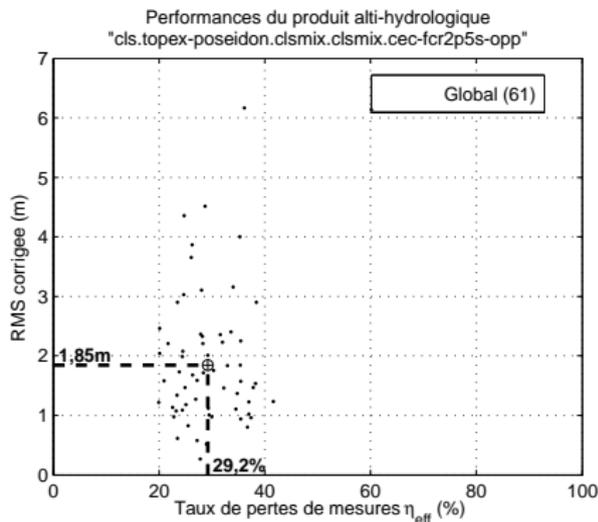


Exemples d'analyses de la qualité : résultats bruts

Comparaison brute : fleuves et nombre de stations virtuelles différents

Produits alti-hydrologiques

- **CASH** (9) : 1,15m ; 28,3%
- **RLH** (41) : 0,77m ; 13,8%
- **AVISO** (60) : 1,35m ; 47,4%
- **CLS** (61) : 1,85m ; 29,2%



Exemples d'analyses de la qualité : résultats bruts

Comparaison brute : fleuves et nombre de stations virtuelles différents

Produits alti-hydrologiques

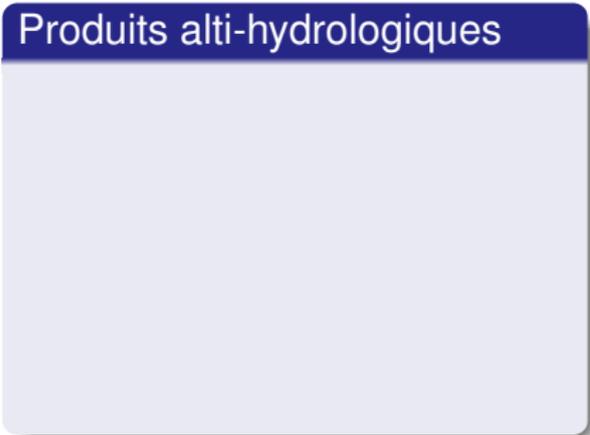
- **CASH** (9) : 1,15m ; 28,3%
- **RLH** (41) : 0,77m ; 13,8%
- **AVISO** (60) : 1,35m ; 47,4%
- **CLS** (61) : 1,85m ; 29,2%

ATTENTION :
Ces résultats bruts
ne sont pas comparables !
(Jeux de stations virtuelles non
représentatifs de la diversité des
configurations fluviales)

Comparaisons de produits alti-hydrologiques . . .

Comparaison de produits sur des ensembles homogènes destations virtuelles

Produits alti-hydrologiques

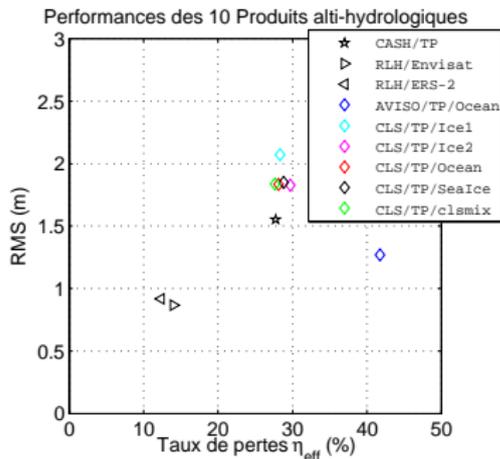


Comparaisons de produits alti-hydrologiques . . .

Comparaison de produits sur des ensembles homogènes destations virtuelles

Produits alti-hydrologiques

- Tronçon fluvial
Amazonne-Solimões
(~ 3000km, 11 traces T/P,
39 traces ENVISAT)

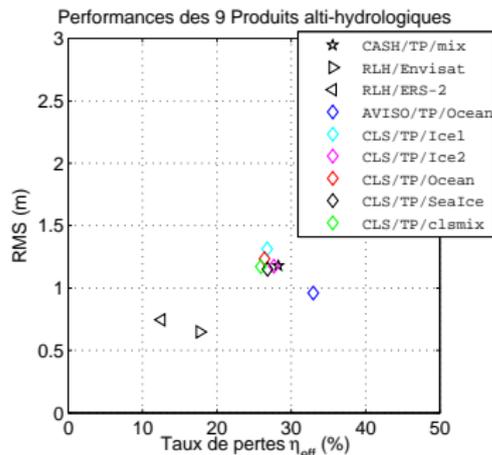


Comparaisons de produits altimétriques . . .

Comparaison de produits sur des ensembles homogènes destations virtuelles

Produits altimétriques

- Tronçon fluvial
Amazonne-Solimões
(~ 3000km, 11 traces T/P,
39 traces ENVISAT)
- 8 stations virtuelles sur les
fleuves Solimões, Amazonne
et Negro

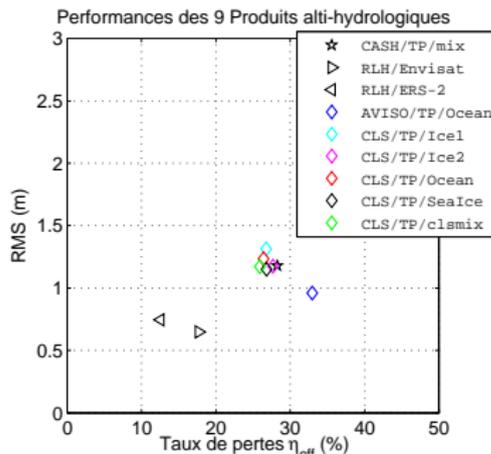


Comparaisons de produits alti-hydrologiques . . .

Comparaison de produits sur des ensembles homogènes destations virtuelles

Produits alti-hydrologiques

- Tronçon fluvial
Amazonne-Solimões
(~ 3000km, 11 traces T/P,
39 traces ENVISAT)
- 8 stations virtuelles sur les
fleuves Solimões, Amazonne
et Negro



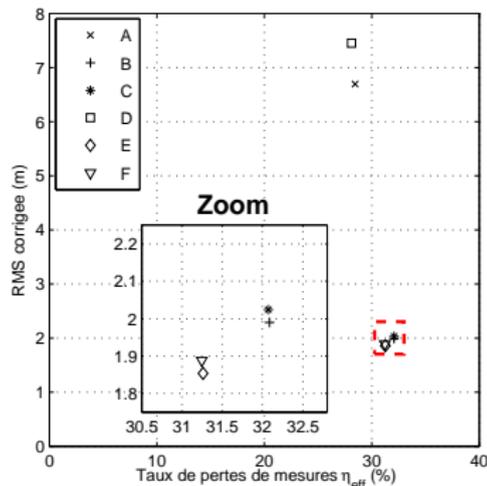
⇒ Comparaisons d'aptitude pertinentes : même stations
virtuelles, même cours d'eau, etc.

Optimisation des chaînes de filtrage automatisées

Produits alti-hydrologiques générés à l'aide de chaînes de filtrage automatisées

Détermination de la meilleure chaîne de filtrage automatisée

- Produits CLS T/P :
 - retracker fixé (Sealce), mêmes corrections, etc.
 - 7 chaînes de filtrage automatisées



⇒ La chaîne de filtrage « E » présente le meilleur compromis
RMS vs η_{eff}

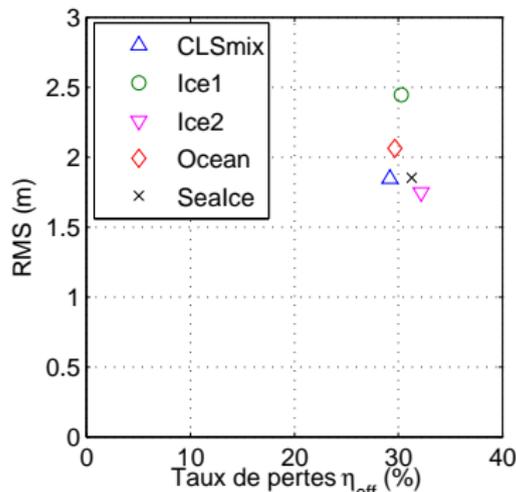
Comparaison d'algorithmes de retracking

Produits alti-hydrologiques générés à partir de différents algorithmes de retracking

Détermination du meilleur algorithme de retracking

- Produits CLS T/P :
 - mêmes chaînes de traitement, mêmes corrections, etc.
 - 4 retrackers + 1 (combinaison des 4 autres : clsmix)

⇒ La combinaison des 4 retrackers (clsmix) donne le meilleur compromis RMS vs η_{eff}



Détermination de l'incertitude (1)

Quelle est l'incertitude associée aux mesures altimétriques ?

Incertitude associée aux mesures altimétriques

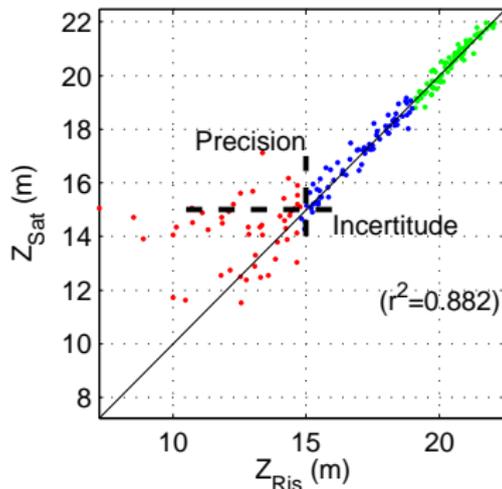
- Indispensable à l'exploitation des produits alti-hydrologiques

Détermination de l'incertitude (1)

Quelle est l'incertitude associée aux mesures altimétriques ?

Incertitude associée aux mesures altimétriques

- Indispensable à l'exploitation des produits alti-hydrologiques
- Attachée à une mesure altimétrique : donne l'intervalle probable de la valeur vraie



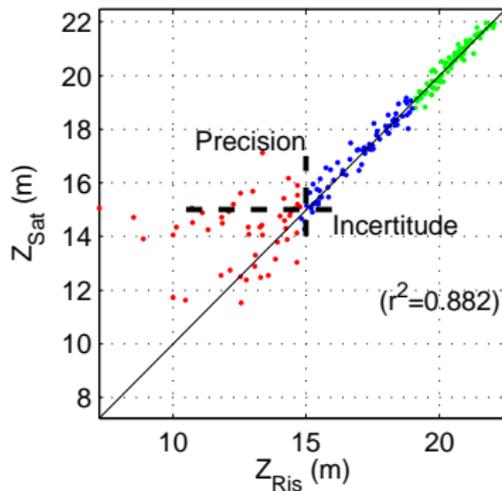
Détermination de l'incertitude (1)

Quelle est l'incertitude associée aux mesures altimétriques ?

Incertitude associée aux mesures altimétriques

- Indispensable à l'exploitation des produits alti-hydrologiques
- Attachée à une mesure altimétrique : donne l'intervalle probable de la valeur vraie

⇒ La détermination de l'incertitude dépend de la connaissance de la précision. . .



Détermination de l'incertitude (2)

Distribution de l'erreur :

- Quantification (méthode)
- Modélisation/estimation

Détermination de l'incertitude (2)

Distribution de l'erreur :

- Quantification (méthode)
- Modélisation/estimation

Précision à l'échelle :

- De la saison hydrologique (hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux)
- De la série temporelle alti-hydrologique (mono-site)
- Du produit alti-hydrologique (multi-site)

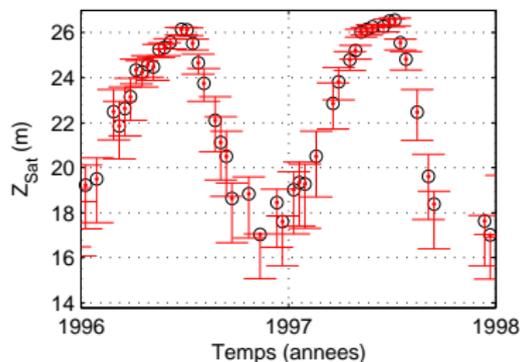
Détermination de l'incertitude (2)

Distribution de l'erreur :

- Quantification (méthode)
- Modélisation/estimation

Précision à l'échelle :

- De la saison hydrologique (hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux)
- De la série temporelle alti-hydrologique (mono-site)
- Du produit alti-hydrologique (multi-site)



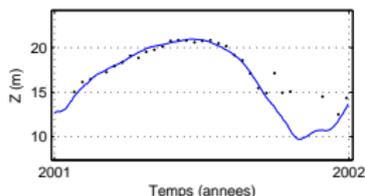
Barres d'incertitude déterminées à partir de la connaissance de la précision à l'échelle saisonnière

Deux concepts de « qualité »

Qualité « altimétrique »

« Aptitude du système altimétrique à **mesurer le niveau des cours d'eau** dans différentes configurations »

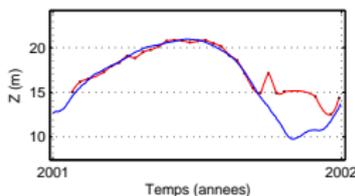
⇒ **Perte et Précision** des mesures



Qualité « hydrologique »

« Aptitude, à partir d'un produit alti-hydrologique, à **reconstituer le signal hydrologique** »

⇒ **Précision et Adéquation** de l'échantillonnage temporel

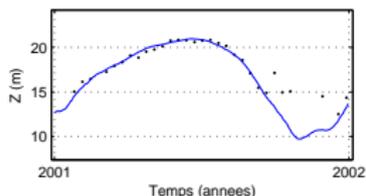


Deux concepts de « qualité »

Qualité « altimétrique »

« Aptitude du système altimétrique à **mesurer le niveau des cours d'eau** dans différentes configurations »

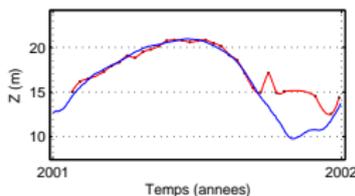
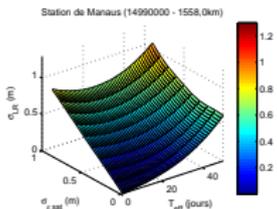
⇒ **Perte et Précision** des mesures



Qualité « hydrologique »

« Aptitude, à partir d'un produit alti-hydrologique, à **reconstituer le signal hydrologique** »

⇒ **Précision et Adéquation** de l'échantillonnage temporel

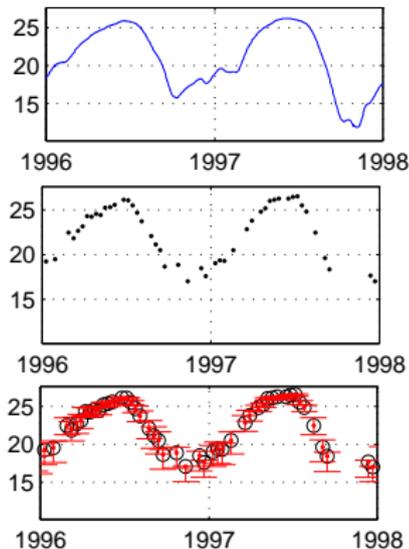


Construction de produits alti-hydrologiques opérationnels (surréchantillonnage journalier et incertitude)

- ⇒ Produit similaire aux mesures in-situ depuis l'altimétrie radar
- ⇒ **Exploitation directe en hydrologie**

Met en œuvre

- Série temporelle alti-hydrologique + incertitude
- Technique de suréchantillonnage



⇒ **Quelle sera l'incertitude d'une série temporelle alti-hydrologique suréchantillonnée ?**

Qualité hydrologique : calcul d'incertitude... (1)

De la qualité altimétrique à la qualité hydrologique...

Facteurs ayant un impact sur la qualité hydrologique :

- La précision des mesures altimétriques
- La période d'échantillonnage effective (T_{eff})
- Respecter les conditions d'échantillonnage (théorème de Shannon)
- La technique de suréchantillonnage

Démarche proposée :

Calcul de la précision sur des **séries temporelles alti-hydrologiques simulées**...

Qualité hydrologique : calcul d'incertitude... (2)

Analyse de séries temporelles altimétriques de synthèse

Génération de séries temporelles alti-hydrologiques de synthèse

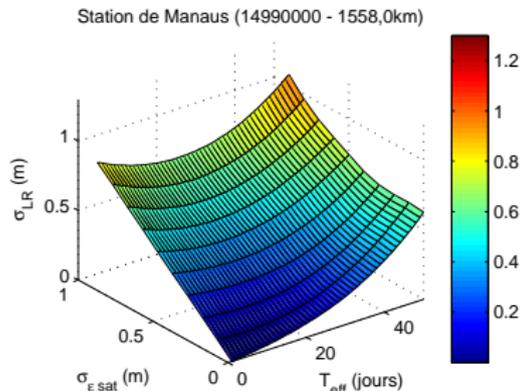
- À partir de Séries temporelles in-situ
 - Sous-échantillonnage temporel
 - Application d'un bruit additif
 - Suréchantillonnage au pas de temps journalier
- ⇒ Calcul de la précision résultante

Qualité hydrologique : calcul d'incertitude... (2)

Analyse de séries temporelles altimétriques de synthèse

Génération de séries temporelles alti-hydrologiques de synthèse

- À partir de Séries temporelles in-situ
 - Sous-échantillonnage temporel
 - Application d'un bruit additif
 - Suréchantillonnage au pas de temps journalier
- ⇒ Calcul de la précision résultante



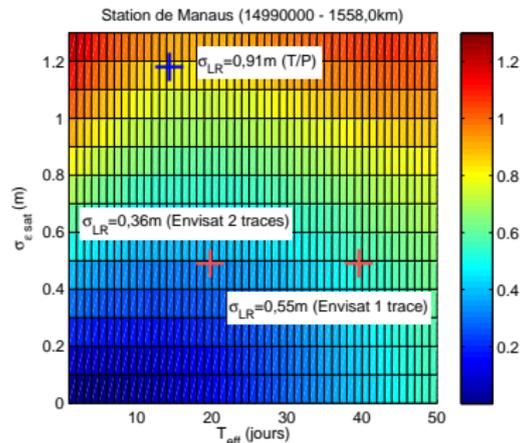
$$\sigma_{\epsilon LR} \approx 0,50\text{m} :$$
$$\begin{cases} \sigma_{\epsilon Sat} = 0 & T_{eff} = 40 \text{ jours} \\ \sigma_{\epsilon Sat} = 0,5\text{m} & T_{eff} = 1 \text{ jour} \end{cases}$$

Qualité hydrologique : calcul d'incertitude... (2)

Analyse de séries temporelles altimétriques de synthèse

Génération de séries temporelles alti-hydrologiques de synthèse

- À partir de Séries temporelles in-situ
 - Sous-échantillonnage temporel
 - Application d'un bruit additif
 - Suréchantillonnage au pas de temps journalier
- ⇒ Calcul de la précision résultante



Qualité hydrologique

- 1 Contexte et objectifs de la thèse
- 2 Développement d'une méthode standard de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques
- 3 Applications de la méthode : qualité de produits existants et incertitude des mesures altimétriques
- 4 Conclusion et perspectives
 - Conclusion
 - Perspectives

Conclusion

Objectifs réalisés

- **Objectif central** : définir une méthode standard de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques
- **Résultats associés** :
 - Qualité d'une série temporelle alti-hydrologique
 - Caractérisation « objective » de la qualité d'un produit alti-hydrologique
 - Aide à l'optimisation : retrackings, fenêtrage, filtrage
 - Calcul de l'incertitude associée aux mesures altimétriques
 - Surréchantillonnage temporel et « qualité hydrologique »

Perspectives et questions de recherche

Perspectives

- Nouveaux capteurs (SWOT), nouveaux algorithmes (retracking)
- Appliquer la méthode à tout produit alti-hydrologique existant
- Appliquer la méthode sur d'autres bassins fluviaux (Niger)
- Précision absolue : nécessite un réseau de stations limnimétriques de référence (Amazone-Solimões ?)
- Développement de techniques de reconstitution des séries temporelles in-situ (modèles hydrauliques ?)

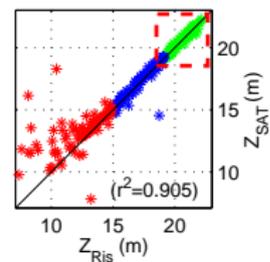
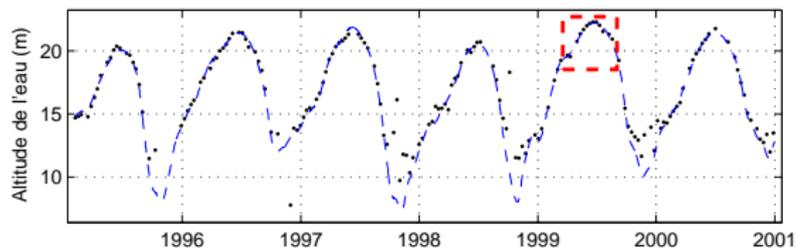
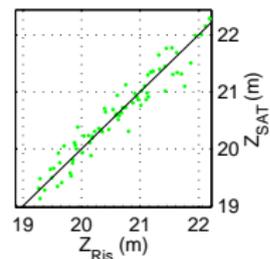
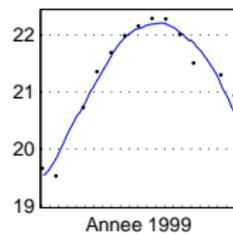
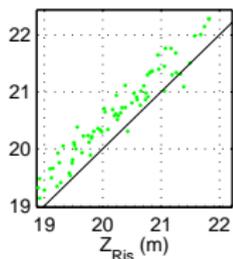
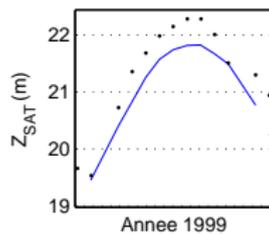
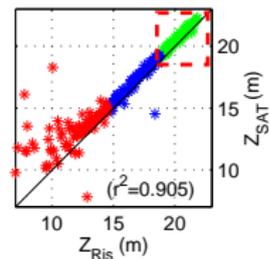
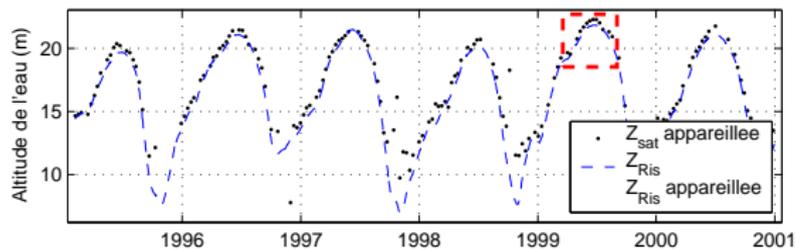
Questions de recherche

- Fusion de données multi-satellite
- Reconstitution de $Z(x, t)$: en tout instant, et tout endroit



Merci de votre attention !

► Biases de hautes eaux



[Bercher, 2008]



AFNOR (1994).

Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie.



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 et applications.

PhD thesis, AgrosParisTech - ENGREF - Université Montpellier II.



Berry, P., Bracke, H., and Jasper, A. (1997).

Retracking ers-1 altimeter waveforms over land for topographic height determination : an expert systems approach.

In 3rd ERS SYMPOSIUM Florence 97.



Birkett, C. M., Mertes, L. A. K., Dunne, T., and Costa, M. H. Jasinski, M. J. (2002).

Surface water dynamics in the amazon basin : Application of satellite altimetry.

Journal of Geophysical Research, 107 (D20), 8059,
doi :10.1029/2001JD000609.



Cauhopé, M., Gennero, M.-C., Dominh, K., Crétaux, J. F., Bergé-Nguyen, M., Cazenave, A., and Seyler, F. (2006).

Worldwide validation of satellite altimetry-based water level time series.

In Geophysical Research Abstracts (Poster Session),
volume 8.



Enjolras, V. (2007).

*Evaluation des performances des nouveaux instruments
radar altimètres imageurs interférométriques spatiaux.
Application à l'océanographie et à l'hydrologie.*

PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure de l'Aréonautique
et de l'Espace.

Définitions générales

- **Station limnimétrique** : Station de mesure in-situ du niveau des cours d'eau
- **Trace** : Projection au sol du passage du satellite
- **Cycle** : Période de revisite du satellite
- **Station virtuelle** : Station de mesure altimétrique du niveau des cours d'eau
- **(Re)tracking** : Analyse de la forme d'onde à l'aide d'un modèle
- **Série temporelle alti-hydrologique** : Série temporelle du niveau des cours d'eau dérivée des mesures d'altimétrie radar (notée Z_{Sat})
- **Produit alti-hydrologique** : Ensemble de séries temporelles alti-hydrologiques