

Master Pro Géophysique de Surface et de Sub-Surface (G2S) IPGP (2008-2009)

M1 = UE 39U1GG4



## STAGE PROFESSIONNEL

# Mesure et analyse des débits d'eau à la naissance de l'Amazone



Rapport soutenu le mercredi 9 septembre 2009 par Camille CONTOUX

**Tuteur de Stage**M. François Métivier
Equipe Géomorphologie
Institut de Physique du Globe de Paris

Maître de stage M. Alain Crave IRD Pérou Lima

## Sommaire

Introductionp.	1
1. Présentation du site d'étudep. 1.1 Généralités sur le bassin amazonienp.2 1.2 Quelques chiffresp.3	2
2. Outils et méthodes de mesure	3 5 6 7 7 9
3. Résultats et analyse	11 11 15 17 18 19
Conclusions et perspectivesp.:	22
Bibliographiep.	23



## CONVENTION DE STAGE

Stage obligatoire $\square$	Stage recommandé	

PGP			
et l'entreprise ou organisme : TRD	e Paris – 4, place Jussieu - 75.	252 Paris cedex 05, représenté pa	r son Directeur
dont le siège est situé (adresse complète) :		7 DIRAFIDRE	120048
dont le siège est situe (adresse complete) :			The state of the s
	Tél.	(51-1)4413223	Fax: (S1-1) 4413 223 2
représenté(e) par M. Mme (nom, prénom) : _			
Qualité (fonction): Représentai	nt de l'IRD au	. Perou	
	il est convenu ce	qui suit :	
ARTICLE I - OBJET DE LA CONVENTION – L'entrepris- it au verso du decument un(e) étudiant(e) de l'Institut L'objectif essentiel de ce stage est l'application pratique Article II - CHARTE DES STAGES EN ENTREPRISE DU charte des stages étudiants en entreprise du 26 avril 2 Article III - VERSEMENT D'UNE GRATIFICATION – Le le montant peut être fixé par convention de branche sens de l'article L. 140-2 du même code. Article 9, aliné ARTICLE IV - CONDITIONS DU STAGE – Outre les cl sans restriction, les conditions particulières de déroule	e de l'enseignement dispensé. Ce stage 126 AVRIL 2006 – Chaque partie signate 2006 annexèe à la présente convention. praque la durée du stage en entreprise e o u par accord professionnel étendu : a 2 de Loi n 2006-396 du 31 mars 2006 lauses générales figurant au verso de la	s'inscrit dans le cadre du diplôme postulé p aire de la convention de stage déclare adhé est supérieure à trois mois consécutifs, celu su, à défaut, par décret. Cette gratification	ar l'étudiant. rer pleinement et sans réserve à la il-ci fait l'objet d'une gratification dont n n'a pas le caractère d'un salaire au
NOM et prénom de l'étudiant(e) : CONT		120	21 06 1988
Domicilié(e): 30, rue Nungesser et Coli		Date de na	aissance: 21 / 00 / 1300
N° Etudiant :	Mail : conto	ux@inan fr	
Diplôme postulé : Master STEP Année :		Spécialité : G2S	
Nom, prénom et qualité de l'enseignant res Adresse administrative : Institut de Physic			
Nom et prénom du responsable du stage de Qualité : Chercheure  Projet de stage : (description détaillée, mise en oe ANALYSE ET CORRECTION	Tél.: (S1-)	13496972 Mail: Ab	
SITUEES À LA CONFLU	ENCE de l'UCAYAL	I GT DU MARANDA	TONS DE JAUGEAGE
Dates du stage : du	20 au	20 inclus	
Modalités du stage : ⊠à temps complet	□ à ter	mps partiel	☐ en alternance
Volume horaire hebdomadaire :			- cir diterriance
Aménagements particuliers (présence requise la	nuit, jours fériés, dimanche, etc.) :		
Montant de la gratification :	mensuels, dont :	€ au titre des avantages en natu	JFG (précisez : transport,
ogement, restauration,):	N. M. Clark	T- 4	
dresse précise du lieu du stage : () N	ALM (Lima) +	20m105	
clauses particulières relatives au stage :			
e stage donne lieu à rédaction d'un rappo	rt.	Fait à Paris, le	
Pour l'entreprise ou organisme (nom du signature et cachet)  Orthogrand Hérail Représentant au Pérou natitut de Recherche pour	L'étudiant (signature)	L'enseignant responsable (signature)	Pour l'Institut de Physique du Globe de Paris
le Développement (IRD)			

Les données de la présente convention font l'objet d'un traitement informatique. La loi du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libériés donne à chacune des parties à la convention un droit d'accès et de rectification pour les données la concernant Ele peut à out effet s'adresser au secrétairst générale de l'instant de Physique du Globe de Paris.

voir au verso clauses générales

#### Remerciements

Je remercie toute l'équipe de l'IRD Pérou, en particulier « la Casita Verde », soit : Alain Crave, qui m'a encadrée et hébergée, Pascal Fraizy qui m'a formée au métier d'hydrologue de terrain, Philippe Vauchel pour ses conseils judicieux, Jean-Sébastien Moquet et Elisa Armijos pour leur accueil et leur bonne humeur constante.

Je remercie chaleureusement François Métivier, l'initiateur de cette aventure.

#### Résumé

Les courbes de tarage des trois stations de la confluence de l'Ucayali et du Marañon présentent une dispersion des mesures en hautes eaux, ce qui limite l'utilisation de ces courbes pour la traduction de la hauteur en débits. Cette dispersion induit une incertitude sur l'estimation du débit cumulé annuel. Dans un premier temps, on effectue une campagne de mesures en hautes eaux pour tenter de mieux caractériser les causes de cette dispersion. Dans un second temps, on effectuera une analyse des bilans d'eau à la confluence, qui permettra de valider ou d'invalider les courbes de tarage des stations de la confluence.

Mots clés : courbes de tarage, dispersion, bilans d'eau, confluence.

#### Abstract

The water discharge rating curves of the three stations at the confluence of the Marañon with the Ucayali show certain dispersion during high-level waters, which avoids the use of the rating curves for translating water level to discharge. This dispersion induces uncertainty in the annuel discharge estimation. To explain this dispersion, we gauge the water discharge during high-level waters. With the results of this fieldwork and those of HyBAm database, we analyze water balance at the confluence. This helps to explain a part of the dispersion around the rating curves, and to validate or invalidate the rating curves at the confluence.

Keywords: rating curves, dispersion, water balance, confluence.

#### Introduction

Le stage se déroule à l'IRD Pérou (Institut de Recherche et Développement), dans le cadre du projet HyBAm (Hydrologie et géochimie du Bassin Amazonien, www.ore-hybam.org).

Créé en 1944, l'IRD (ex-Orstom) est un organisme de recherche public français dédié au développement des pays du Sud. Ses recherches se déclinent autour de six grandes priorités : lutte contre la pauvreté, migrations internationales, maladies émergentes infectieuses, changement climatique, ressources en eau, écosystèmes et ressources naturelles.

Au Pérou, l'IRD est présent depuis 1966.

Le projet HyBAm a commencé au Brésil en 1982, puis s'est étendu aux autres pays du bassin amazonien. Il a pour objectif l'étude des régimes hydrologiques, sédimentaires et géochimiques des fleuves amazoniens afin de caractériser l'érosion des Andes, les transferts d'eau et de matière dans la plaine amazonienne et l'impact d'El Niño sur ces transferts, ainsi que les conséquences de l'impact anthropique sur le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin. Au Pérou, ces recherches se basent sur des observations acquises sur un réseau de stations hydrométriques opérées par le SENAMHI (Service National de Météorologie et d'Hydrologie, Pérou). Certaines de ces stations sont intégrées à un réseau plus vaste couvrant l'ensemble du bassin amazonien : les stations de l'Observatoire de Recherche en Environnement " ORE HYBAM ".

Les questions auxquelles doit répondre HyBAm sont donc : quels sont les flux d'eau qui circulent dans l'Amazone ? Quelle est la variabilité de ces flux d'eau sur le réseau amazonien et quelle est l'incertitude sur les valeurs proposées, notamment sur les valeurs de bilan annuel.

Pour y répondre, le projet HyBAm met en réseau sur tout le bassin amazonien un ensemble de stations gérées par les institutions locales, où sont installées des stations météorologiques ainsi que des échelles limnimétriques permettant de lire la hauteur d'eau. La construction d'une courbe de tarage mettant en relation hauteur d'eau et débit permet d'estimer le débit d'eau uniquement en connaissant la cote à l'échelle, ce qui est beaucoup plus facile et moins coûteux à mesurer. Cependant, la construction d'une courbe de tarage nécessite de nombreuses campagnes de mesure, en hautes eaux et en basses eaux. En raison du coût d'une campagne et de la difficulté d'accès de ces stations, on ne peut faire qu'une ou deux campagnes par an et par station, ce qui implique qu'il faut des années pour construire une courbe de tarage valide. Aujourd'hui on possède suffisamment de mesures pour commencer à valider les courbes, mais les mesures sont relativement dispersées sur les courbes de tarage des stations de la confluence de l'Ucayali et du Marañon.

Mon travail a été d'effectuer une campagne de mesures sur ces stations de la confluence, puis d'analyser la dispersion des mesures, qui induit une incertitude sur le calcul du débit annuel, pour essayer de la comprendre et de la corriger. En d'autres termes, il s'agit de tester la fiabilité des courbes de tarage en analysant l'incertitude qu'elles induisent sur les bilans d'eau.

#### 1. Présentation du site d'étude

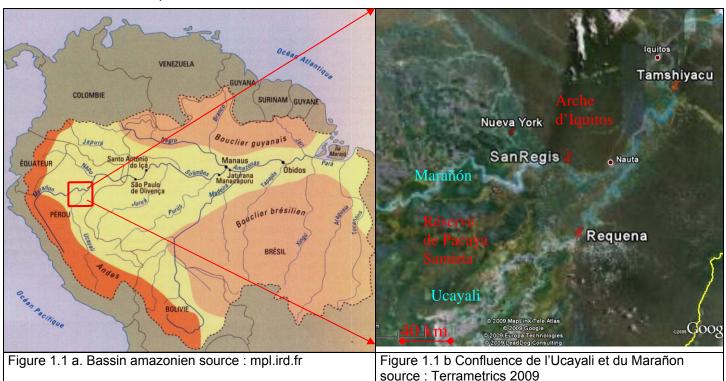
#### 1.1 Généralités sur le bassin amazonien

L'Amazone se forme au Pérou à la confluence des fleuves andins Marañon et Ucayali, puis du Napo plus en aval, qui vient de l'Equateur (figure 1.1.a)

Le bassin amazonien est le bassin le plus important du monde à la fois par sa taille (6 000 000 km², ~5% des terres émergées) et son débit moyen annuel (209 000 m3/s, selon Molinier et al., 1996). Il s'étend sur 7 pays : le Brésil, qui correspond à 63% de sa superficie, le Pérou (16%), la Bolivie (12%), la Colombie (6%), l'Equateur (2%), le Venezuela et le Guyana (1%). Il abrite la plus grande forêt tropicale de la planète. L'Amazone est à lui seul à l'origine d'environ 1/5 du volume total d'eau douce déversée dans les océans du monde. Comme il s'étend de part et d'autre de l'équateur, le bassin de l'Amazone comprend des régimes hydrologiques très différents selon les régions.

Le bassin amazonien reçoit en moyenne 2460 mm/an (Molinier et al., 1991) de précipitations. Dans la partie brésilienne du bassin, la distribution saisonnière des précipitations montre des différences sensibles entre le nord et le sud. Au nord de l'équateur, le maximum pluviométrique est observé de juin à août alors qu'il se manifeste de décembre à février dans le sud du bassin.

Le calcul du débit de l'Amazone et celui de ses principaux tributaires est compliqué par les fortes vitesses observées mais aussi par la très faible pente des cours d'eau qui ne dépasse pas 2 cm/km dans leur partie aval. A cause de cela, la poussée des eaux se fait essentiellement par l'onde de crue des fleuves d'origine andine (Molinier et al., 1996). De ce fait, les relations hauteurs-débits sont rarement univoques.



Les mesures et l'analyse des débits se feront sur 3 stations de la confluence de l'Ucayali et du Marañon, là où débute l'Amazone (figure 1.1.b). Ce sont les stations de Requena sur l'Ucayali, San Regis sur le Marañón, et Tamshiyacu sur l'Amazone.

Le Marañon prend sa source quelques 160 km au nord-est de Lima, à 5800 m d'altitude. Il s'étend sur 1600 km et draine la partie nord du Pérou et une partie de l'Equateur. L'Ucayali prend sa source au nord du lac Titicaca, à la confluence des rivières Tambo et Urubamba. Long de 1900 km, il draine le sud du Pérou. Ses eaux sont très minéralisées, comme celles du Marañon et de l'Amazone : on parle d'eaux blanches. Le Marañón et l'Ucayali font partie des principales sources de sédiments de l'Amazone, qui se forme à la confluence de ces deux fleuves andins un peu en aval de Nauta (figure 1.1.b)

#### 1.2 Quelques chiffres

Station	Fleuve	Lat.	Long.	Aire drainée	Qmoyen	CVi	Qmax	Qmin
				(km²)	(m3/s)		(m3/s)	(m3/s)
Obidos	Amazone	-1.93	-55.50	4 680 000	172 400	0.09	240 000	100 200
Tamshiyacu	Amazone	-4.00	-73.16	726 400	31 700	0.12	46 700	16 400
San Regis	Marañon	-4.40	-74.00	362 000	14 900	0.16	22 200	6 200
Requena	Ucayali	-5.00	-73.90	350 000	13 500	0.17	23 200	4 400

Tableau 1.1 tableau des grandeurs caractéristiques des stations de la confluence. Valeurs de débit moyen annuel (Qmoyen), débit mensuel maximum (Qmax) et débit mensuel minimum (Qmin) sur la période 1974-2004. CVI coefficient de variabilité interannuelle (Espinoza Villar, 2009).

Le bassin versant de Tamshiyacu couvre 56% de la superficie du Pérou, soit 1,33 fois la France. La moitié de ce bassin est située dans les Andes. Il est étendu en latitude sur plus de 20°, ce qui fait qu'on y observe différents climats. Tamshiyacu est situé en aval de la confluence de l'Ucayali, qui draine le Sud, et du Marañón, qui arrive de l'Ouest. Le bassin versant de San Regis, sur le Marañón, est andin à 43%, contre 50% pour celui de Requena, sur l'Ucayali. Le bassin de San Regis inclut les sous bassins des rivières venant de l'Equateur, ainsi que la partie sud du Huallaga.

Les précipitations annuelles sur le bassin sont de 1600 mm pour la période 1964-1997 (Espinoza et al., 2006). Le cycle hydrologique annuel débute en août pour les pluies et en octobre pour les débits, ce qui veut dire qu'on observe les maximums de pluie en février-mars, et les maximums de crue en avril-mai. Le déphasage de deux mois entre pluie et débit correspond au temps de concentration dans le bassin.

#### 2. Outils et méthodes de mesure

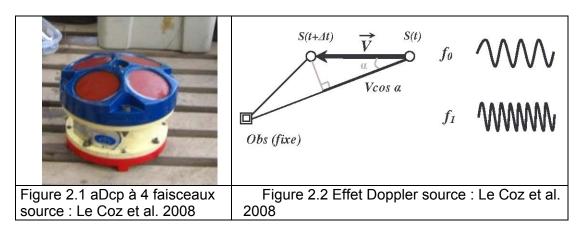
Les courbes de tarage sont construites grâce à des mesures de débit effectuées par les chercheurs d'HyBAm depuis 1996. L'instrument de mesure utilisé est l'aDcp (profileur acoustique de courant à effet Doppler, acoustic Doppler current profiler). Il a été montré que cette méthode est bien adaptée pour les rivières amazoniennes (Filizola et Guyot, 2004). Les cotes à l'échelle au moment du jaugeage sont lues par les chercheurs effectuant les mesures sur la station.

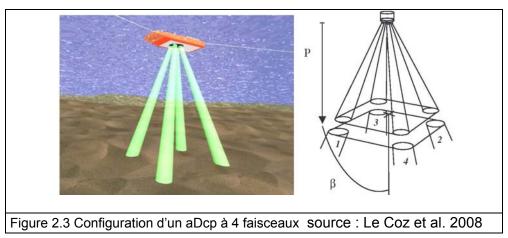
Les cotes à l'échelle journalières permettant l'estimation des débits grâce aux courbes de tarage sont lues quotidiennement par les observateurs du SENAMHI (Service National de Météorologie et d'Hydrologie, Pérou).

### 2.1 L'aDcp et le logiciel Winriver

#### 2.1.1 Principe

L'aDcp est constitué de 4 céramiques piézo-électriques grâce auxquelles il envoie un signal ultrasonore. Ce signal est envoyé dans l'eau par chaque faisceau, puis rétrodiffusé par les particules en suspension, avec un décalage de fréquence dépendant de la vitesse radiale de la particule : c'est l'effet Doppler, ou le fait qu'un observateur fixe perçoive un décalage de fréquence sur une onde en mouvement. Comme l'aDcp est aussi en mouvement, l'effet Doppler se produit deux fois, la première fois de la céramique à la particule, la seconde fois de la particule à la même céramique.

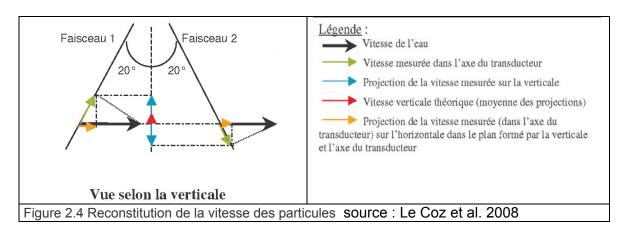




Chaque céramique envoie un faisceau d'ondes. Selon chaque faisceau, l'écho renvoyé par les particules est découpé en séquences temporelles. Chaque séquence temporelle correspond à une cellule (ou « bin ») spatiale. La distance de la cellule au capteur est déterminée par le temps de retour du signal émis et la célérité C du son dans l'eau, qui est recalculée en fonction de la température de l'eau mesurée au niveau de l'appareil, avec un taux de salinité considéré comme nul en rivière.

#### Reconstitution des vitesses 3D

Seule la vitesse radiale  $V\cos\alpha$  (selon l'axe du faisceau) peut être mesurée par effet Doppler. Il faut au moins trois faisceaux non coplanaires pour reconstituer les trois composantes de la vitesse, par projection.



Pour que la reconstitution géométrique du vecteur vitesse 3D soit valide, il faut que les vitesses radiales mesurées selon chaque faisceau correspondent à un champ de vitesse homogène dans la couche horizontale explorée. Afin de déterminer les vitesses horizontales et verticales, l'aDcp a besoin de connaître précisément à tout moment son inclinaison : il est muni d'un capteur d'inclinaison qui permet de faire des corrections.

#### Détermination du tirant d'eau

La réflexion du signal ultrasonore par le fond correspond à un pic d'intensité acoustique dans le signal reçu. La distance du fond au capteur est alors déterminée grâce au temps de retour du signal émis et à la célérité *C* du son dans l'eau.

#### 2.1.2 Montage et utilisation

L'aDcp est fixé sur le côté du bateau grâce à un support mobile permettant de relever et d'immerger l'aDcp facilement. Il est branché à une batterie 12 V, et à l'ordinateur de travail par un port RS 232. Il doit être immergé à au moins 40 cm de profondeur, pour éviter que les bulles d'air qui se forment à cause du remous lors de la traversée ne perturbent le signal.



Une fois le dispositif mis en place, il faut calibrer le compas interne de l'aDcp (capteur d'inclinaison), qui dévie à chaque passage d'une masse métallique alentour (bateaux notamment). Il est donc important de le calibrer juste avant le jaugeage, une fois l'aDcp mis en place sur son support et immergé dans l'eau. Pour ce faire, on utilise un logiciel de calibration (BBTalk), et on effectue une série de ronds dans l'eau (plusieurs fois 360°). Le temps d'effectuer la calibration permet la mise en température de l'aDcp (pour le calcul des vitesses). Ensuite, après avoir, le cas échéant, connecté un GPS (de préférence avant la calibration), et vérifié son fonctionnement, la mesure peut commencer.

#### 2.1.3 Le logiciel WinRiver

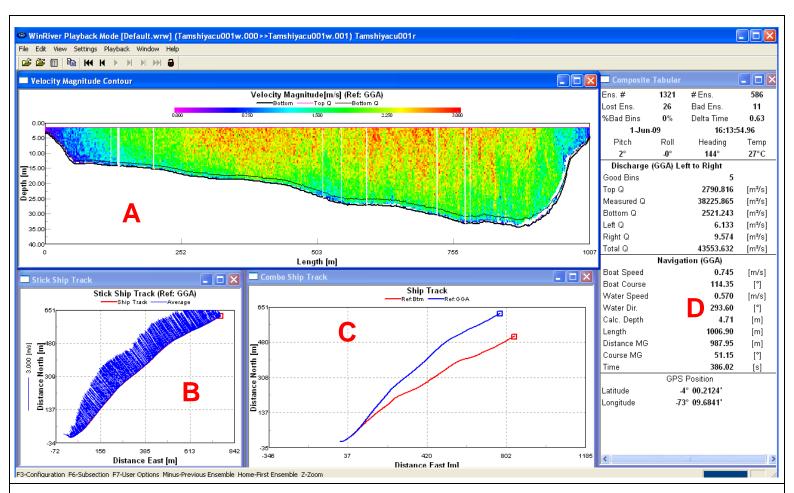


Figure 2.7 : Vue du logiciel Winriver après une traversée

- A : visualisation de la section du fleuve et de la vitesse (échelle de couleur) de chaque cellule, dans le référentiel du GPS (ref : GGA). On remarque quelques bandes blanches (perte de signal).
- B : visualisation des vecteurs vitesses du courant (en bleu) par rapport à la trajectoire du bateau (en rouge) dans le référentiel du GPS. On remarque que la trajectoire est bien perpendiculaire au courant.
- C : Comparaison de la trajectoire donnée par le GPS (en bleu), et par rapport au fond (en rouge). Aux endroits où les trajectoires divergent, il y a présence de fond mobile. Par la suite lorsqu'elles redeviennent parallèles, il n'y a pas de fond mobile.
- D : Ce tableau permet de visualiser en temps réel tout ce que l'aDcp mesure et calcule, notamment la vitesse de l'eau et celle du bateau, la profondeur, la distance parcourue (length) et la distance en ligne droite au point de départ (distance MG). Dans l'idéal ces deux distances devraient etre égales, mais il est pratiquement impossible de traverser à faible vitesse un grand fleuve, perpendiculairement au courant, en ligne droite. On visualise aussi la position GPS.

WinRiver est le logiciel d'utilisation de l'ADCP. Il permet de dialoguer avec l'ADCP, de visualiser et d'enregistrer les mesures. Lorsqu'on travaille avec un GPS, on le connecte à WinRiver, ce qui permet d'avoir la trajectoire réelle du bateau, et non la trajectoire par rapport au fond, qui diverge du trajet réel en cas de fond mobile.

Comme l'aDcp se réfère au fond, qu'il considère comme immobile, en cas de fond mobile les vitesses et donc les débits sont sous-estimés. En ajoutant le GPS, on n'est plus dans le référentiel du fond, la correction sur les vitesses se fait automatiquement et les débits sont correctement estimés.

#### 2.2 Missions

#### 2.2.1 Jaugeage liquide

Le jaugeage liquide permet d'obtenir une mesure du débit du fleuve. Il consiste en une série d'allers-retours sur la largeur du fleuve, de façon perpendiculaire au courant, et à vitesse faible. Les trajets (ou transects) doivent tous avoir les mêmes points de départ et d'arrivée, qui sont le plus près possible des rives. Au minimum 4 transects sont nécessaires pour obtenir une mesure de débit fiable. Généralement, on s'arrête lorsqu'on obtient un écart type sur tous les transects inférieur à 1 ou 2%. Avec WinRiver, lors de la mesure, il est très facile de connaître cet écart type grâce au Discharge History Tabular (figure 2.8), qui s'affiche grâce à une simple pression de la touche « F12 » :

File Name	#Ens.	Start Time	Total Q	Start Bank	Left Dist.	Left Ens#	Left Q	Top Q	Mea
			[m³/s]		[m]		[m³/s]	[m³/s]	[m <sup>q</sup>
amshiyacu000r.000	629	13:32:19	41351.625	Right	20.00	659	32.213	2924.743	35979
amshiyacu001r.000	669	13:40:09	40226.085	Left	20.00	676	15.586	2788.780	3511
Tamshiyacu002r.000	590	13:48:30	41848.167	Right	20.00	2008	16.262	2887.528	3658
Tamshiyacu003r.000	626	13:56:01	40866.194	Left	20.00	2026	12.328	2909.929	3558
amshiyacu004r.000	640	14:03:59	41745.112	Right	20.00	3384	23.737	2903.138	3644
Tamshiyacu005r.000	596	14:12:06	40532.629	Left	20.00	3394	12.336	2892.829	3528
Average	625		41094.969				18.744	2884.491	3583
itd. Dev.	29		660.210				7.807	48.692	605
itd./  Avg.	0.05		0.02				0.42	0.02	0

Figure 2.8 Validation d'un jaugeage liquide grâce au logiciel WinRiver

Ainsi, on peut savoir en temps réel, à la fin d'un transect, s'il est nécessaire d'effectuer un nouvel aller retour, ou non. Mais le logiciel ne fait pas tout, et il faut s'assurer lors de la traversée qu'il n'y a pas trop de perte de signal (bandes blanches), pouvant être dues notamment à la présence de végétation sur l'appareil, ou à la perte du fond (l'appareil ayant comme référentiel le fond).

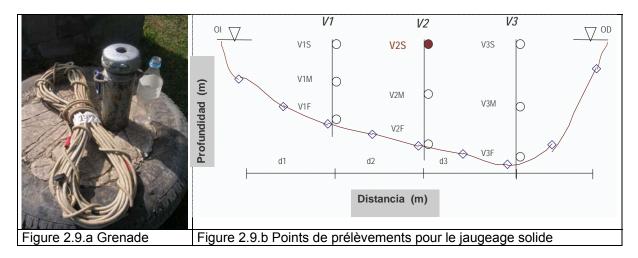
L'intérêt d'une mesure de débit est d'alimenter une courbe de tarage. La mesure se fait alors sur une section définie plus ou moins proche d'échelles limnimétriques. On fait alors une lecture d'échelle avant et après le jaugeage.

#### 2.2.2 Jaugeage solide

Le jaugeage solide est la méthode de prélèvement d'échantillons d'eau utilisée par le projet HyBAm dans tout le bassin amazonien. Elle permet de caractériser les flux de sédiments en suspension dans les fleuves amazoniens.

Le principe du jaugeage solide est simple : on veut prendre suffisamment d'échantillons pour représenter les variations du flux de sédiments le long de la section, aussi bien en profondeur que sur la largeur. D'un autre côté, le matériel dont on dispose est très rudimentaire : une corde, et une grenade en ferraille où l'on dispose une bouteille en plastique (figure 2.9.a).

La procédure est celle-ci : on définit 3 verticales, découpant la section en quatre parties égales (figure 2.9.b). La section est la même que celle du jaugeage liquide, généralement effectué auparavant. Les verticales ont été repérées avec un point au GPS à main lors du jaugeage liquide et sont définies par leur distance à la rive gauche. Sur chaque verticale on effectue un prélèvement en surface, un autre à mi-profondeur, et un dernier juste au dessus du fond, car il s'agit de caractériser la matière en suspension et non le transport de fond.



Remarque: pour prélever à la bonne profondeur, il faut que la corde qui tient la grenade soit la plus verticale possible. Pour cela, il faut que le bateau ait une vitesse nulle par rapport à l'eau. Mais l'endroit de l'échantillonnage est également précisément défini sur la section, est il est plus important d'être sur la bonne verticale, c'est-à-dire à la bonne distance de la rive, que sur la bonne section. Pour être à la bonne distance de la rive, mais avec une vitesse nulle, c'est-à-dire avec le bateau à la dérive, se laissant porter par le courant, il suffit, un peu avant d'arriver sur la verticale, de remonter brusquement le courant sur une centaine de mètres, puis d'éteindre les moteurs (figure 2.10). Le bateau à la dérive arrive alors avec une vitesse nulle sur la verticale d'échantillonnage de la section. On jette la grenade quelques 20 m avant d'arriver à la section, le temps que la corde se déroule et que la bouteille s'ouvre. Au moment où la bouteille s'ouvre, on est au bon endroit, l'aDcp est dans l'eau et on note le numéro de la verticale au moment de l'échantillonnage, ce qui permet de le replacer dans l'espace.

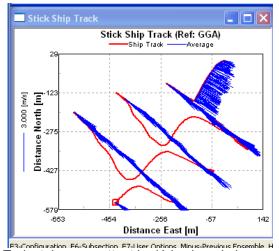


Figure 2.10 Trajectoire permettant la dérive lors du jaugeage solide

Les échantillons sont d'abord filtrés pour récupérer les matières en suspension au laboratoire de l'UNALM (Université Agricole de La Molina, à Lima). Ils sont ensuite envoyés au laboratoire de géochimie du LMTG à Toulouse pour l'analyse des éléments majeurs.

#### 2.2.3 Points fixes

Les points fixes permettent de connaître le profil vertical des vitesses en un point de la section, la variabilité temporelle des vitesses sur le profil vertical, la contrainte cisaillante sur le fond, et la vitesse du fond mobile lorsqu'il y en a.

Un point fixe consiste à rester au même point sur le fleuve pendant au moins 15 min, avec l'aDcp en fonctionnement. On ne s'ancre pas, mais on se stabilise avec le moteur. En pratique, il relève de l'impossible de rester exactement à la même position pendant 15 min. On considère qu'on reste au même point lorsqu'on est dans un cercle de rayon inférieur à 1% de la largeur de la rivière (soit dans un cercle de 20 m de diamètre à Tamshiyacu, où le fleuve est large de 1 km).

#### 2.2.4 Déroulement d'une mission



Figure 2.11.a Echelles limnimétriques en basses eaux à Tamshiyacu



Figure 2.11.b Echelles limnimétriques en moyennes eaux à Requena

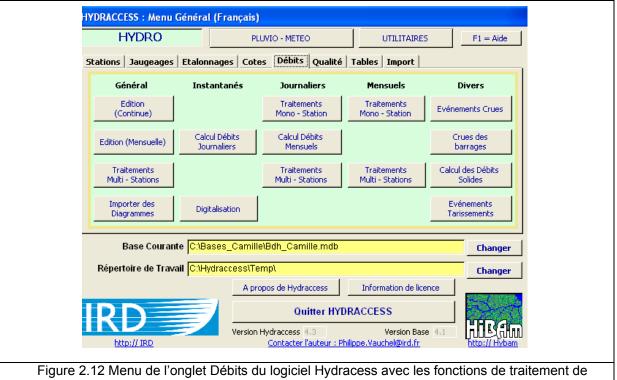


Figure 2.11.c Echelles limnimétriques en basses eaux à San Regis

Les missions que j'ai effectuées en mai-juin 2009 avaient pour but de jauger les trois stations de la confluence ainsi qu'une petite station sur le Tigre, affluent du Marañon en amont de San Regis. En plus de faire des mesures de débit, on effectue au moins un jaugeage solide à chaque station, ainsi que des points fixes, au minimum deux par station où l'on détecte du fond mobile. La location du bateau et les salaires du chauffeur et du mousse étant payables par jour, il faut travailler le plus vite possible, en utilisant le moins d'essence possible. Typiquement, si on ne rencontre aucun problème technique (moteur du bateau, faux contact dans les instruments...), et que la météo permet de travailler (par grosse pluie il devient difficile pour le chauffeur de garder le cap, en raison du manque de visibilité. De plus, il ne faut pas mouiller l'ordinateur de travail...), alors la mission peut être effectuée en trois jours.

N.B. A chaque fois qu'on le peut, il faut niveler entre elles les échelles visibles (donc plutôt en basses eaux). Lorsqu'on a un repère altimétrique absolu, comme une borne GPS, il faut niveler par rapport à celle-ci.

#### 2.3 Gestion de la base de données : Hydraccess (Vauchel, 2005)



données.

Le logiciel Hydraccess est un outil de gestion de bases de données hydrologiques très complet, développé par Philippe Vauchel, hydrologue à l'IRD. C'est avec ce logiciel que les courbes de tarage, les chroniques de hauteurs d'échelle et les hydrogrammes du projet HyBAm sont élaborés. Il permet d'appliquer des méthodes de correction sur les courbes de tarage et sur les hauteurs à l'échelle. Il permet aussi de comparer chaque année hydrologique, et de comparer des hydrogrammes journaliers, pentadaires, mensuels ou annuels de plusieurs stations. Hydraccess permet aussi de gérer les données de flux de sédiment, de calculer des débits solides, de stocker les résultats des jaugeages solides, et de gérer les données de pluviométrie.

Il est très utile pour effectuer des calculs de bilans d'eau, et il permet de comparer les résultats de plusieurs courbes de tarage pour une même station.

#### 3. Résultats et analyse

Les courbes de tarage construites par les hydrologues du projet HyBAm pour cette région permettent d'obtenir les flux d'eau du Marañon, de l'Ucayali et de l'Amazone à Tamshiyacu. Cependant, les mesures présentent une certaine dispersion autour de la courbe de tarage définie, ce qui induit une incertitude sur l'estimation des débits annuels moyens et cumulés. Dans un premier temps, on essaiera de déterminer les causes de la dispersion des mesures. Ensuite, on effectuera le calcul du bilan d'eau à la confluence avec les courbes de tarage et avec les jaugeages liquides, ce qui est une façon de valider ou d'invalider les courbes et les mesures.

#### 3.1 Courbes de tarage et bilans d'eau

#### 3.1.1 Première analyse des courbes de tarage

N.B. Sur toutes les figures suivantes, lorsqu'on parle de crue et de décrue, on ne considère que la plus grande longueur d'onde, c'est-à-dire que tous les points entre le début de la montée des eaux et l'amorce de la baisse des eaux après l'épisode de crue sont considérés comme en crue, et tous les autres points sont considérés comme en décrue. Or les hydrogrammes ne sont pas lisses mais plein de variations de petites et moyennes longueurs d'onde, ce qui fait qu'il est parfois impossible de dire si à une date précise le fleuve est en crue ou en décrue.

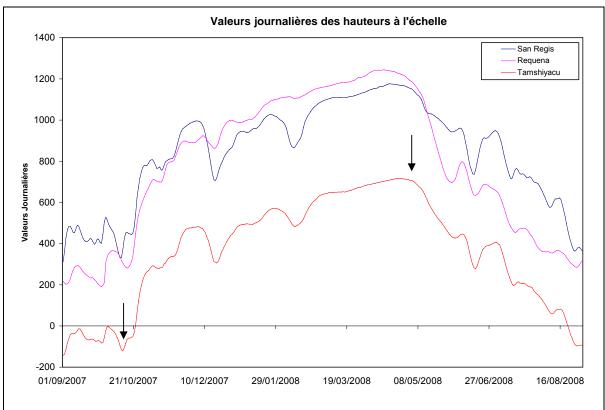


Figure 3.1 Chroniques des cotes à l'échelle des stations de la confluence pour l'année hydrologique 2007-2008. Les flèches indiquent les limites de la période de crue à Tamshiyacu.

#### a) Tamshiyacu

La courbe de tarage de Tamshiyacu (figure 3.2) présente peu de dispersion des mesures. Les mesures faites vers le milieu du mois de mai 2009 sont les plus hautes effectuées jusqu'à présent. En revanche, on remarque que tous les jaugeages effectués durant la mission de mai-juin 2009, c'est-àdire au début de la décrue, sont en dessous de la courbe.

En hautes eaux, on observe que les jaugeages situés au dessus de la courbe sont en crue et ceux situés en dessous sont en décrue. Compte tenu de la dispersion des mesures, on a une incertitude sur les débits à Tamshiyacu de -4% à +3%.

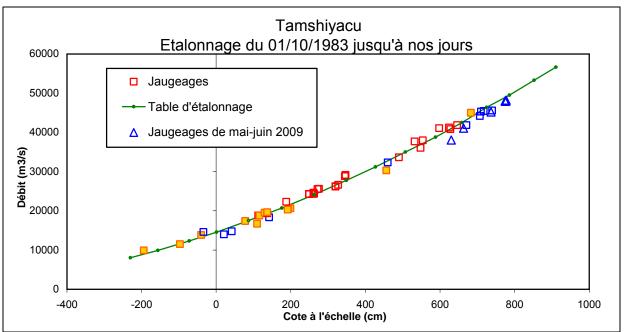


Figure 3.2 Courbe de tarage de Tamshiyacu : en rouge, les jaugeages effectués durant la crue. En bleu, les jaugeages effectués durant la décrue. Les points en jaune n'ont pas pu être déterminés comme en crue ou en décrue.

#### b) Requena

Sur la courbe de tarage de Requena (figure 3.3), on observe une dispersion répartie en deux familles de points lors des hautes eaux. Grâce aux chroniques des hauteurs d'eau, on a repéré les points en montée de crue et les points en décrue. On observe que tous les points au-dessus de la courbe, sauf un, sont des mesures durant la montée de crue, et que tous les points en-dessous de la courbe sont des mesures faites pendant la décrue. Cependant, les mesures faites au début de la dernière décrue, en mai-juin 2009, sont situées sur la courbe, plus proche du groupe de points supérieurs, ce qui contredit l'hypothèse. A Requena, la dispersion des mesures induit une incertitude sur les débits de  $\pm$  6%.

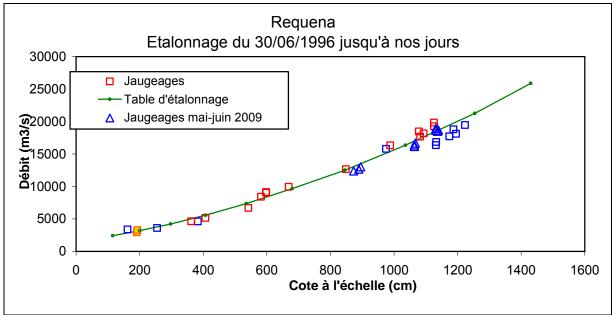


Figure 3.3 Courbe de tarage de Requena. Les points rouges sont en crue, les bleus en décrue. Les points jauges n'ont pas pu être déterminés comme en crue ou en décrue.

Pour cette station, on pense que la dispersion peut être due à un effet de courbe de remous du Marañon, qui ferait augmenter la hauteur d'eau de l'Ucayali à Requena. En effet, un affluent qui est en crue peut constituer un obstacle à l'écoulement de l'autre affluent à une confluence. Par analogie on appelle cela une courbe de remous car on obtient des cotes différentes à débit constant. Sur le graphe suivant (figure 3.4), on exprime la différence entre le débit estimé à Requena grâce à la courbe de tarage ci-dessus (figure 3.3) et le débit effectivement mesuré, en fonction de la différence de hauteur aux échelles entre l'Ucayali et le Marañon, uniquement pour les jaugeages en hautes eaux, là où l'on observe deux nuages de points sur la courbe de tarage.

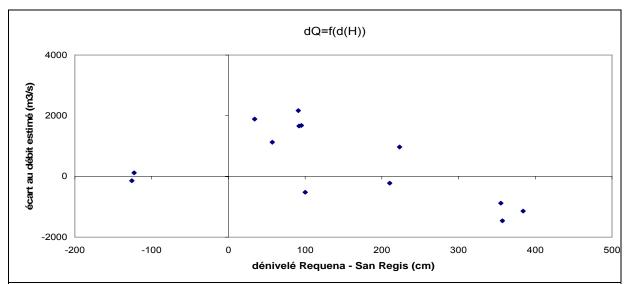
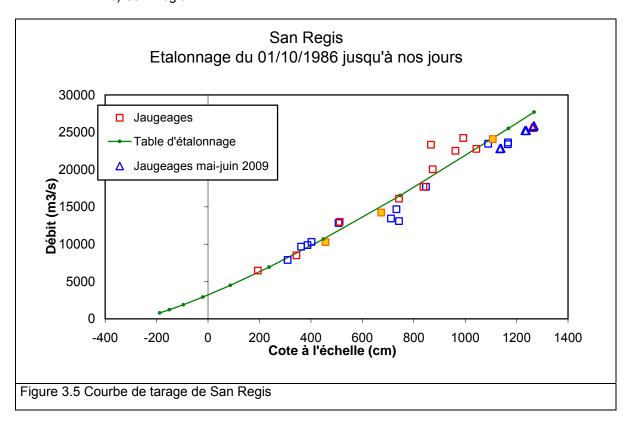


Figure 3.4 Relation entre écart à la courbe de tarage et différence de hauteur d'eau entre Requena et San Regis

Sur la figure 3.4, les points dont l'ordonnée est supérieure à zéro correspondent aux points situés en dessous de la courbe de tarage, et les points dont l'ordonnée est négative, aux jaugeages situés au dessus de la courbe de tarage. On remarque que les 3 points les plus supérieurs à la courbe sont aussi ceux dont la différence de hauteur d'eau entre Requena et San Regis est la plus élevée. Ceci suggère un éventuel contrôle de la hauteur d'eau du Marañon sur la dispersion des points de la courbe de Requena.

#### c) San Regis



A San Regis, les mesures sont assez dispersées autour de la courbe (figure 3.5), et ce même en moyennes eaux (vers 700 cm). Comme à Tamshiyacu, les jaugeages effectuées en mai-juin 2009 donnent les mesures de débit les plus élevées jusqu'alors, avec plus de 23 000 m3/s. La hauteur à l'échelle est de plus de 12 m, ce qui est la hauteur la plus haute enregistrée depuis 10 ans. En classant les données selon la crue/décrue, on observe que les données au dessus de la courbe sont toutes des données de crue. En revanche, seulement les 4/5 des mesures inférieures à la courbe sont des données de décrue.

L'incertitude sur l'estimation des débits compte tenu de la dispersion autour de la courbe s'étend de -9% à +7%.

#### d) Remarques générales

La dispersion des mesures peut avoir différentes causes, notamment une mauvaise lecture de la hauteur due à des échelles qui n'ont pas été nivelées régulièrement. Notamment, on a vu que beaucoup des mesures de décrue étaient situées en dessous de la courbe de tarage (pour les 3 stations), ce qui peut être du au fait que les échelles sont devenues bancales ou ont été légèrement dénivelées à cause de mouvements des berges durant la crue. A Requena, on a émis l'hypothèse de la courbe de remous du Marañon qui exercerait une influence sur l'Ucayali à la confluence, qui ferait augmenter la hauteur d'eau à Requena, sans que le débit de l'Ucayali n'augmente en réalité. Pour San Regis, il est probable que lors des hautes eaux, une partie du débit ne passe pas par la station mais quitte le Marañon un peu en amont pour se déverser dans la plaine d'inondation. Enfin on pense aussi que la plaine d'inondation exerce un contrôle en agissant comme un réservoir d'eau qui stocke dès le début du débordement du fleuve, et déstocke au-delà d'une autre valeur seuil en déversant son trop plein dans l'une ou les deux rivières.

On effectue alors une étude des bilans d'eau à la confluence, avec les mesures de débits et les estimations données par les courbes de tarage, pour expliquer quels phénomènes rentrent en jeu.

#### 3.1.2 Bilans d'eau lors des campagnes de jaugeage

Lors des campagnes de jaugeages à la confluence, la première façon de valider les mesures de jaugeage liquide est de faire le bilan d'eau à la confluence, c'est-à-dire de sommer les débits jaugés sur les affluents et de les soustraire au débit mesuré à l'aval de la confluence. En théorie la somme des débits jaugés sur les affluents doit être égale au débit après la confluence, et donc le bilan d'eau devrait être nul. C'est le cas lors de campagnes de mesures effectuées par Philippe Vauchel sur l'Ucayali à Atalaya (en amont de Requena) et en Afrique sur le fleuve Sénegal. Cependant ce sont des confluences impliquant des débits d'eau beaucoup plus faibles que celui de l'Amazone à Tamshiyacu.

Le problème pour faire le bilan de façon précise à la confluence est le suivant : à quel moment doit-on considérer le débit à chaque station pour obtenir un bilan nul ? En effet, les sections jaugées sont éloignées de Tamshiyacu de 152 km pour San Regis, et de 160 km pour Requena. Il faut se placer au même endroit sur l'onde de crue à chaque station pour obtenir un bilan correct. Pour cela, on va estimer les temps de transfert entre les stations des affluents et Tamshiyacu, premièrement en effectuant une analyse de la propagation de la crue par corrélation linéaire, grâce à l'application de corrélation multiple d'Hydracess, en se basant sur les chroniques de hauteurs d'eau. Le résultat de cette corrélation est que le temps de transfert varie entre 0 et 4 jours de San Regis à Tamshiyacu, et entre 0 et 11 jours de Requena à Tamshiyacu, en fonction de la hauteur d'eau. Cependant, cette corrélation ne prend pas en compte la confluence des deux fleuves qui se fait un peu en aval de Nauta. Il faudrait pour être plus exact, effectuer une première analyse de propagation à partir des stations des affluents jusqu'à Nauta, puis de Nauta à Tamshiyacu. On possède bien les hauteurs d'eau à Nauta, mais on sait aussi qu'elles sont très entachées d'erreurs, du fait d'un observateur peu présent, et donc inutilisables.

On a donc, dans un deuxième temps, estimé les temps de transfert « à la main ». En superposant les chroniques des trois stations sur le même graphe, on peut suivre un pic de crue (figure 3.1). On trouve avec cette méthode que le temps de transfert San Regis-Tamshiyacu varie entre 1 et 3 jours, en fonction de la hauteur d'eau. A Requena, les ondes sont très plates, probablement à cause de la plaine d'inondation en amont, ce qui rend difficile le suivi des ondes. Néanmoins, on peut supposer que le temps de transfert Requena-Tamshiyacu est similaire, étant donné que la distance parcourue est à peu près égale, et les débits des deux rivières également.

Malheureusement, les mesures de débits ne sont pas effectuées en respectant les temps de transfert. Généralement, le temps entre le jaugeage sur l'affluent et le jaugeage à Tamshiyacu est de 1 ou 2 jours, et il faut faire le jaugeage à Tamshiyacu après les jaugeages sur les affluents, pour aller dans le même sens que l'onde, ce qui n'est pas toujours respecté.

Connaissant les temps de transfert, on prend la date du jaugeage à Tamshiyacu comme date de référence. On extrapole, grâce aux chroniques de hauteurs d'eau et aux jaugeages effectués, le débit à la date respectant le temps de transfert. Ensuite on soustrait le débit mesuré à Tamshiyacu de la somme des débits aux affluents, ce qui nous donne le bilan d'eau à la confluence.

Cependant, bien que l'aDcp soit l'instrument le plus précis en hydrométrie pour ce type de fleuves, il faut considérer l'incertitude de mesure, évaluée à environ 2% sur les grands fleuves par J.-L. Guyot. Comme on considère ici trois jaugeages, on somme l'incertitude, soit 2% sur chaque jaugeage, ce qui constitue une estimation haute de l'incertitude.

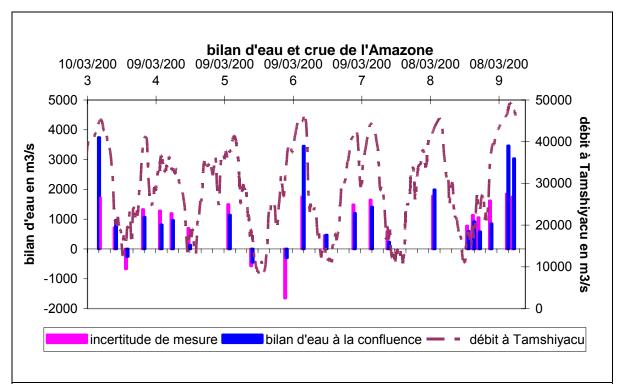
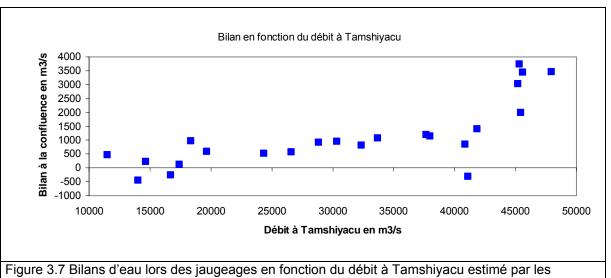


Figure 3.6 Bilan d'eau à la confluence à partir des campagnes de jaugeage, comparé à l'hydrogramme de Tamshiyacu. Pour comparer l'incertitude au bilan, on a posé une incertitude négative pour les bilans négatifs et une incertitude positive pour les bilans positifs, uniquement pour ne pas charger la figure avec des barres d'incertitude à la fois positives et négatives.

On observe sur la figure 3.6 que sur 22 bilans d'eau, seuls 3 sont négatifs. Le signal étant presque toujours positif, on ne peut pas considérer qu'il est dû aux incertitudes de mesure, auquel cas il serait réparti de part et d'autre de l'axe des abscisses. D'autre part, on observe que l'amplitude des bilans d'eau est assez bien corrélée avec le débit à Tamshiyacu, ce qui confirme la présence d'une structure temporelle de ce signal. On observe que les points de hautes eaux sont fortement positifs, notamment lors des années 2003, 2006 et 2009, ce qui indique un débit d'eau à Tamshiyacu non mesuré à Requena ni à San Regis lors des hautes eaux. Il est probable que ce débit vienne de la plaine d'inondation (déstockage), présente entre l'Ucayali et le Marañón, depuis en amont des stations de jaugeage.

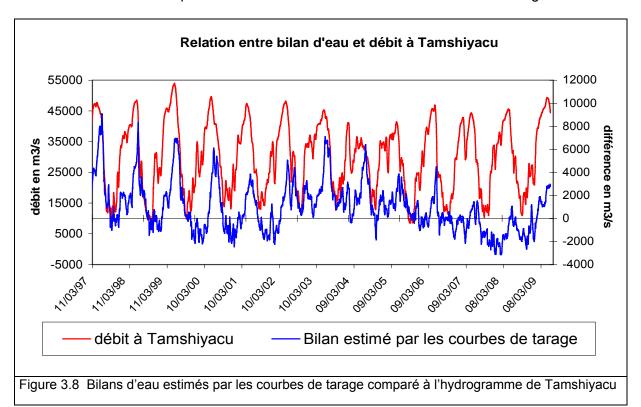
La figure 3.7 suggère l'apparition d'une valeur seuil au-delà de laquelle le bilan d'eau n'est clairement plus respecté. Ceci suggère que la source d'eau non mesurée à San Regis et à Requena apparaît au-delà d'une certaine hauteur d'eau seuil, en rapport avec le fonctionnement de la plaine d'inondation entre les deux rivières.



courbes de tarage

En conséquence de cette étude, on ne peut pas choisir la nullité du bilan comme critère de validation des jaugeages liquides. En revanche, on va s'intéresser à l'évolution dans le temps du signal des bilans d'eau afin de les expliquer.

#### 3.1.3 Chroniques de bilans d'eau calculés avec les courbes de tarage



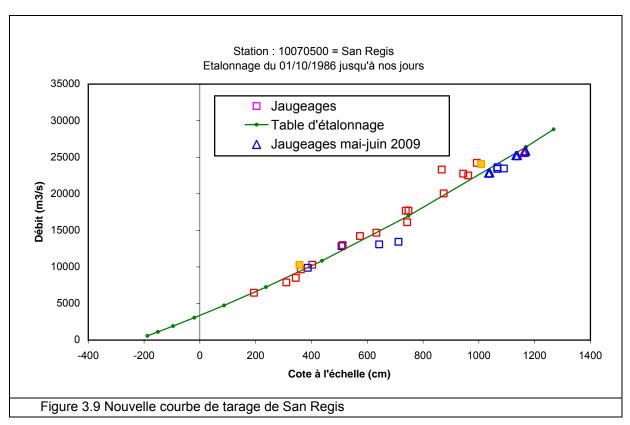
On ne possède que 22 campagnes de jaugeage, ce qui est trop peu pour étudier l'évolution temporelle des bilans. Pour étudier cette évolution il faut des données de débit journalières, ce que nous donne la courbe de tarage grâce aux chroniques de hauteurs d'eau. On observe une très forte corrélation entre la structure du signal des bilans d'eau et le débit à Tamshiyacu (figure 3.8). Il apparait que lors des crues, le bilan d'eau à la confluence devient fortement positif, ce qui confirme les résultats rencontrés avec l'analyse des jaugeages.

Cependant, on observe une diminution générale de la courbe des bilans à partir de 2007, bien que la structure reste périodique. On n'observe pas cette diminution avec les résultats des bilans à partir des jaugeages. Cette diminution suggère que l'une des courbes de tarage (probablement celle de San Regis, qui présente le plus de dispersion) donne des estimations des débits trop éloignés de la réalité à partir de 2007. De plus, les jaugeages effectués à San Regis depuis 2007 sont tous en dessous de la courbe de tarage, ce qui suggère un détarage de la station. Il faut donc effectuer une nouvelle analyse de cette courbe et surtout des chroniques de hauteurs d'eau associées.

#### 3.1.4 Nouvelle analyse de la station de San Regis

La première source à vérifier est celle des chroniques de cotes à l'échelle. En effet, les stations limnimétriques sur le bassin amazonien péruvien sont assez rudimentaires, les échelles tombent très régulièrement et les observateurs ne renivellent pas toujours, sans compter les erreurs de lecture. On estime alors les cotes de San Regis à partir de 2007 avec un modèle de corrélation effectué avec les cotes de Tamshiyacu, Requena et San Regis antérieures à 2007. Cette estimation donne des cotes depuis 2007 inférieures d'environ 1 m aux cotes observées. Ceci suggère, en accord avec les observations précédentes, que l'apparent détarage de la station est dû à un décalage des échelles ou à une mauvaise lecture (changement de référence, l'observateur lit 8,67 au lieu de 7,67 par exemple). On corrige les chroniques de cotes, en enlevant 1 m à chaque lecture de cote à partir de fin 2006, date à partir de laquelle on observe une divergence entre l'estimation et la valeur observée.

Avec les nouvelles hauteurs à l'échelle, la dispersion des points autour de la courbe de tarage est réduite (figure 3.9). On trace une nouvelle courbe de tarage, puis on effectue une nouvelle estimation des bilans d'eau avec cette courbe (figure 3.11).



Par ailleurs, les hauteurs à l'échelle de San Regis ayant été corrigées, la différence des hauteurs à l'échelle entre Requena et San Regis est recalculée (figure 3.10). On remarque que la dispersion des points sur la figure 3.9 est inférieure à celle de la figure 3.3, ce qui appuie la théorie de l'effet de remous du Marañon pour expliquer une partie de la dispersion des points autour de la courbe de tarage de Requena. Cependant il faudrait effectuer plus de mesures pour pouvoir confirmer cet effet.

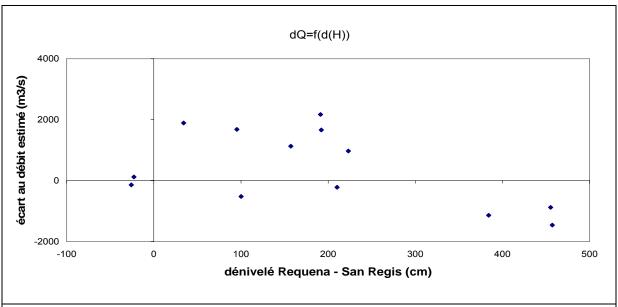
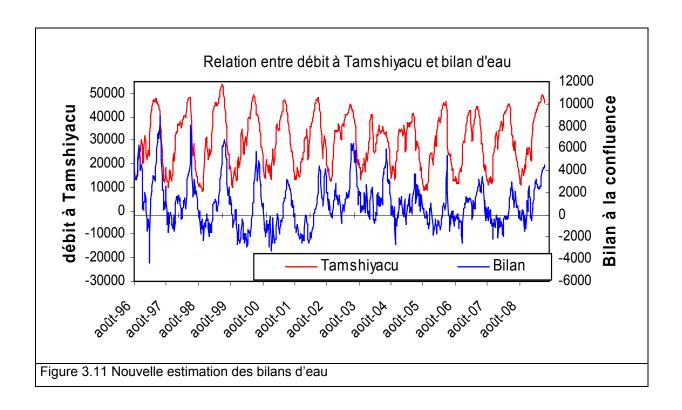


Figure 3.10 Nouvelle relation entre écart à la courbe de tarage et différence de hauteur d'eau entre Requena et San Regis

#### 3.1.5 Rectification de la modélisation de l'évolution temporelle des bilans d'eau

L'estimation des bilans d'eau, grâce à la correction des cotes à San Regis et à la nouvelle courbe de tarage ne présente plus de diminution à partir de 2007 (figure 3.11). Elle a conservé sa structure périodique et est très bien corrélée aux débits estimés à Tamshiyacu. Cependant, comme il y a dispersion des mesures autour des courbes de tarage de Requena et de San Regis, on pourrait choisir des courbes plus hautes ou plus basses ce qui décale la courbe des bilans d'eau (courbe bleue figure 3.10) vers le haut ou vers le bas. Il est donc nécessaire de valider cette estimation avec les bilans d'eau tirés des jaugeages liquides.



#### 3.1.6 Validation du choix de la courbe de tarage

On va maintenant comparer les bilans estimés par les courbes de jaugeage (figure 3.11) aux bilans obtenus lors des campagnes de mesures de débit à la confluence (figure 3.6).

Les bilans d'eau estimés grâce aux courbes de tarage sont en concordance avec ceux calculés grâce aux jaugeages des campagnes de mesure (figure 3.12), ce qui montre que les courbes de tarage donnent une bonne estimation des bilans d'eau à la confluence. Avec ce résultat, on vient de valider les courbes de tarage des stations.

.

On est capable d'estimer correctement le bilan d'eau à la confluence, grâce à la précision des courbes de tarage. Il nous reste à déterminer les phénomènes qui causent ce bilan non nul, et les quantifier.

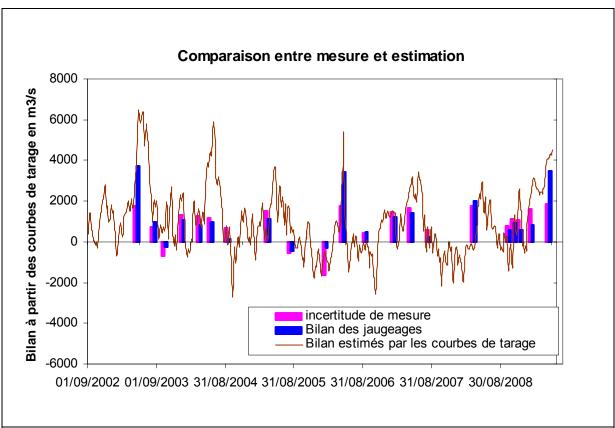


Figure 3.12 Comparaison des bilans estimés par les courbes de tarage et des bilans effectués par les campagnes de mesures.

#### 3.2 Hypothèses sur les causes des bilans non nuls

#### ❖ Le bassin entre la confluence et Tamshiyacu

En tout premier lieu, comme la structure des bilans est corrélée à celle des crues des fleuves, il faut tenir compte de l'apport des petits affluents qui se deversent dans les fleuves étudiés, notamment dans l'Amazone, entre les 3 stations de jaugeage.

On part de la connaissance de la lame d'écoulement dans la région (qui dépend de la pluie et de l'infiltration), et est évaluée à 1200 mm par an (Espinoza, 2009). Comme le bassin restant entre les 3 stations fait 11 350 km² environ, on obtient une contribution de 434 m3/s de débit moyen annuel apporté par les affluents. La différence de débit entre Tamshiyacu et les stations des affluents représente 716 m3/s en débit moyen annuel (de septembre 1997 à septembre 2008), soit 2,4% du débit moyen annuel à Tamshiyacu.

Les 282 m3/s restants sont peut-être dus au flux de la plaine d'inondation, ou bien ce sont les incertitudes sur les courbes de tarage.

#### Conclusions et perspectives

En premier lieu, on a montré que la dispersion des points autour de la courbe de tarage de Requena était probablement contrôlée par la hauteur d'eau du Marañon. En voulant valider les mesures de jaugeage liquide en faisant les bilans d'eau à la confluence, on a montré qu'il existait une structure temporelle de ces bilans, fortement corrélée à la crue des fleuves, expliquée en grande partie par l'apport des petits affiluents. La structure des bilans a permis de mettre en lumière une erreur sur les cotes à San Regis, ce qui démontre que l'une des sources de la dispersion des points est le décalage des échelles. La rectification des cotes a permis de réduire la dispersion des mesures autour de la courbe de San Regis, et donc de diminuer l'incertitude sur les débits estimés.

Enfin, on a montré grâce à l'estimation des bilans d'eau que les courbes de tarage proposées permettent une estimation du débit moyen annuel à 2,4% près.

Ce rapport montre la nécessité d'avoir des chroniques de cotes à l'échelle fiables. Pour cela, il faudrait installer des échelles sur des éléments non mobiles, comme sur des murs de béton, au moins pour les échelles de hautes eaux. Une autre solution envisageable est de placer un capteur de pression qui permet un suivi du niveau en continu.

#### Bibliographie

Espinoza J.-C., 2009, Impact de la variabilité climatique sur l'hydrologie du bassin amazonien, *Université Pierrre et Marie Curie*, Thèse de doctorat

Espinoza J.-C.,Fraizy P., Guyot J.-L., Ordoñez J., Pombosa R., and Ronchail J., 2006, La variabilité des débits du rio Amazonas au Pérou, *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts* Filizola N., and Guyot J.-L, 2004, The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determinations on the river Amazon. *Hydrol. Sci. J* 

Le Coz J., Pierrefeu G., Saysset G., Brochot J.-F., Marchand P., Mesures hydrologiques par profileur Doppler

Molinier M., Da Silva Maia A. C. & Dos Santos D. F.,1991, Bilan hydrique de l'Amazone: méthodologie et premiers résultats. In: *IX Simpôsio Brasileiro de Recursos Hidricos* (Rio de Janeiro, Novembre 1991)

Molinier M., Guyot J.-L., de Oliveira E., and Guimares V., 1996. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. *L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement*