



ROTARY CLUB DISTRICT 1750
DIJON BOURGOGNE



MEMOIRE DE STAGE

Récupération de sources d'eau et de la biodiversité à partir de la reforestation et son impact sur l'environnement

Poursuite et améliorations méthodologiques de la prise de mesure du débit d'un cours d'eau équatorien dans le cadre d'un projet de reforestation dans le Parc Los Yapas

Maître de stage : **Gabriela AGUILAR**

Tuteur pédagogique : **Philippe AMIOTTE-SUCHET**

MAURI Sven

Promotion 2013-2014



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement les personnes qui m'ont aidé au sein du parc à construire le barrage, effectuer mes mesures de débits, et qui m'ont accompagné pour réaliser la cartographie et du parc et du bassin versant et sans qui je n'aurais pas pu réaliser ce projet : Victor AGUILAR, Kam, Fernando, Luis, Bocu, Edison, Gabriela AGUILAR, Dominique.

Je remercie grandement Karla VASCONEZ, Javier CARRERA et Benjamin De LAPPARENT, notamment pour la documentation qu'ils m'ont fourni.

Je tiens également à remercier la présence et le soutien que m'ont apportés durant ce stage, Victor AGUILAR, Yolanda LOPEZ AGUILAR, Isabel LOPEZ, Rosio, Florine DAVI, Patrica CHIROT.

Je tiens enfin à remercier Philippe AMIOTTE-SUCHET pour avoir accepté d'être mon tuteur pendant ce stage.

SOMMAIRE

<u>INTRODUCTION</u>	p.1
I) <u>CONTEXTE ACTUEL/ETAT INITIAL</u>	p.2
I.1) Etat actuel de la reforestation/déforestation	p.2
<u>I.1.1) A l'échelle mondiale</u>	p.2
<u>I.1.2) A l'échelle de l'Amérique Latine et de l'Equateur</u>	p.2
<u>I.1.3) A l'échelle de la région de Puyo</u>	p.2
<u>I.1.4) Dans le Parc</u>	p.3
I.2) La relation reforestation/précipitations	p.3
<u>I.2.1) Apports bibliographiques</u>	p.3
<u>I.2.2) Climat en Equateur et dans la région du Parc Los Yapas</u>	p.4
<u>I.2.3) Cas du Parc Los Yapas</u>	p.5
I.3) La relation reforestation/débit	p.6
<u>I.3.1) Apports bibliographiques</u>	p.6
<u>I.3.2) Cas du Parc Los Yapas</u>	p.6
I.3.2.1) Méthodologie de mesure de débit	p.6
I.3.2.2) Etat des connaissances du bassin versant lors de l'étude d'Anna LI-MARCHETTI.	p.7
II) <u>PROPOSITION DE SOLUTIONS/ METHODOLOGIES</u>	p.8
II.1) Méthodologie utilisée dans le cadre de la relation reforestation/précipitations	p.8
<u>II.1.1) Matériels utilisés</u>	p.8
II.1.1.1) Pluviomètre	p.8
II.1.1.1.a) Installation du matériel	p.9
II.1.1.1.b) Récolte des données	p.9
<u>II.1.2) Méthodologie</u>	p.9
II.1.2.1) Observation des différences de précipitations au-dessus et en-dessous du couvert arbustif	p.9
II.1.2.2) Observation des différences de précipitations au-dessus du couvert arbustif et en milieu prairial	p.10
II.2) Méthodologies utilisées dans le cadre de la relation reforestation/débit	p.10
<u>II.2.1) Matériels utilisés</u>	p.10
II.2.1.1) Matériels utilisés dans le cadre de la description du bassin versant	p.10
II.2.1.1.a) GPS	p.10
II.2.1.1.b) Logiciel GPS utility (5.20)	p.10
II.2.1.1.c) Logiciel GvSIG	p.11
II.2.1.2) Matériels utilisés dans le cadre de la mesure de débits	p.11

II.2.1.2.a) Limnimètre	p.11
II.2.1.2.b) Limnigraphe	p.11
II.2.1.2.c) Flotteurs	p.11
II.2.1.2.d) Bassine	p.11
II.2.1.2.e) Chronomètre	p.12
<u>II.2.2) Description du bassin-versant</u>	p.12
<u>II.2.3) Description du cours d'eau sur le lieu de la station de mesure</u>	p.12
<u>II.2.4) Méthodologie retenue pour mesurer le débit de manière continue : création d'une station hydrométrique</u>	p.12
II.2.4.1) Choix de la méthode	p.12
II.2.4.2) Mise en place de la méthode	p.14
II.2.4.2.a) Pose du limnimètre	p.14
II.2.4.2.b) Création d'un seuil de contrôle artificiel	p.15
II.2.4.2.c) Création d'une méthode de mesure en période de faible débit	p.15
II.2.4.2.d) Choix de la station de mesure	p.16
II.2.4.2.e) Section transversale	p.17
II.2.4.2.f) Section mouillée (Sm)	p.17
II.2.4.2.g) Proposition d'une mesure de vitesse moyenne - méthode incomplète par flotteur	p.18
II.2.4.2.h) Création de la courbe de tarage	p.19

III) <u>RESULTATS/INTERPRETATION</u>	p.20
III.1) La relation reforestation/précipitation	p.20
<u>III.1.1) Marge d'erreurs</u>	p.20
<u>III.1.2) Pertinence du choix de l'échelle de temps de mesure</u>	p.20
<u>III.1.3) Source de manque de données</u>	p.21
<u>III.1.4) Différences de précipitations observées en milieu couvert (au-dessus et en-dessous des arbres)</u>	p.21
III.1.4.1) Etude sur la période totale	p.21
III.1.4.2) Etude pour les journées de faible pluviométrie	p.23
III.1.4.3) Cas des journées de pluviométrie « normale » précédant des journées de précipitations faibles	p.24
<u>III.1.5) Différence entre le milieu couvert (au-dessus des arbres) et le milieu ouvert</u>	p.25
III.1.5.1) Résultats/Interprétations	p.25
III.2) La relation reforestation/débit	p.26
<u>III.2.1) Limite de la méthode – étude sur un unique bassin versant</u>	p.26
<u>III.2.2) Description du bassin versant</u>	p.26
III.2.2.1) Récolte des données GPS	p.28
III.2.2.2) Présentation du bassin versant	p.28
<u>III.2.3) Description du cours d'eau</u>	p.29

III.2.3.1) Hauteur d'eau moyenne au sein de la station de mesure	p.29
III.2.3.2) Vitesse d'écoulement moyenne au sein de la station de mesure	p.30
III.2.3.3) Profil en travers de la section	p.30
III.2.3.4) Granulométrie du substrat au sein de la station de la mesure	p.30
<u>III.2.4) Mesure des débits</u>	p.31
III.2.4.1) Choix du nombre de chiffres significatifs pour la mesure des débits	p.31
III.2.4.2) Résultat des mesures de débit par méthode volumétrique	p.31
III.2.4.2.a) Source d'erreur et limite de la méthode	p.31
III.2.4.2.b) Choix de la méthode de prise de mesures	p.33
III.2.4.3) Comparaison des mesures de débit par méthode volumétrique avec celles effectuées par Anna LI-MARCHETTI	p.33
III.2.4.4) Résultats des mesures de débit par méthode incomplète aux flotteurs	p.33
III.2.4.4.a) Résultats des sections transversales	p.33
III.2.4.4.b) Calcul de l'aire de la section mouillée S_m	p.35
III.2.4.4.c) Choix du coefficient K pour la mesure de débit avec la méthode incomplète des flotteurs	p.35
III.2.4.4.d) Résultats des vitesses obtenues par flotteurs	p.35
III.2.4.4.d.i) Sources d'erreurs	p.35
III.2.4.4.d.ii) Limites liées à la méthode	p.37
III.2.4.4.d.iii) Limite liée à l'environnement	p.37
III.2.4.4.e) Etablissement de la courbe de tarage	p.37
III.2.4.4.e.i) Courbe de tarage avec la méthode volumétrique	p.38
III.2.4.4.e.ii) Courbe de tarage avec la méthode incomplète des flotteurs	p.38
III.2.4.4.e.iii) Courbe de tarage avec la comparaison des deux méthodes volumétriques et incomplètes par flotteurs	p.39
III.2.4.4.e.iiii) Courbe de tarage finale	p.40
 <u>DISCUSSION/PRECONISATIONS</u>	 p.42
 <u>CONCLUSION</u>	 p.44
 <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	 p.45

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Figure montrant l'utilisation de la méthode de calcul de vitesse par utilisation de deux chronomètres à aiguilles rattrapantes	p.50
Annexe 2 : Extraits et exemples des résultats des précipitations récoltées journalièrement	p.51
Annexe 3 : Résultats des précipitations récoltées journalièrement et étant inférieur à 1 l/m ²	p.51
Annexe 4 : Résultats (en bleu) des précipitations récoltées journalièrement après les périodes sèches inférieurs à 1 l/m ² (en orange)	p.51
Annexe 5 : Extraits et exemples de mesure de débit par la méthode volumétrique	p.52
Annexe 6 : Extraits et exemples de mesure de débit par la méthode incomplète aux flotteurs	p.52

NOTES :

Le prix annoncé des produits dans ce rapport sont relatifs. Tout d'abord, ils ont été consultés à une date donnée, certains présentant des offres promotionnelles ; de plus, certains produits sont énoncés en dollars (USD) ou euros. Dans ce rapport, ils ont tous été retranscrits en euros selon la valeur du dollar le jour de la consultation. La plupart des sites consultés sont des sites européens. De ce fait, il faut également prendre en compte le prix d'envoi ce qui n'a pas été fait dans ce rapport. De plus un même produit peut avoir un prix variant du simple au quadruple selon le site consulté. Dans ce rapport, les prix les moins chers ont été choisis en tenant compte des offres mais sans tenir compte du prix d'envoi.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Carte 1 : Localisation de la commune de Fatima	p.2
Carte 2 : Occupation des sols au sein de la commune de Fatima	p.3
Carte 3 : Extrait de la carte représentant le nombre de mois secs au cours de l'année pour l'Equateur	p.5
Carte 4 : Représentation du Parc Los Yapas et de son occupation du sol	p.8
Carte 5 : Présentation des installations nécessaires à la mesure des débits	p.14
Carte 6 : Représentation du bassin versant du Rio Los Yapas	p.27
Carte 7 : Géologie de la région de Puyo, le parc appartenant à l'ensemble B1 (bleu foncé), une roche perméable primaire semi consolidés de type dépôt de piedmont et pyroclastique	p.29
Figure 1 : Description d'un seuil de contrôle	p.15
Figure 2 : Représentation des erreurs de lecture causées par un mauvais placement des graduations du limnimètre au fil du courant	p.15
Figure 3 : Présentation d'une section transversale délimitée par la bordure rouge et une section mouillée délimitée par le tirant d'eau (en noir)	p.17
Figure 4 : Profil en long	p.18
Figure 5 : Représentation de l'effet « d'entonnoir » au sein du couvert forestier. Réalisé par Sven MAURI	p.22
Figure 6 : Clé de détermination des faciès d'écoulement	p.30
Figure 7 : Calcul des vitesses et positions des flotteurs	p.36
Figure 8 : Exemple de trajet non rectiligne d'un flotteur au sein de la station de mesure (contre-courant)	p.37
Graphique 1 : Présentation des précipitations totales annuelles (mm) en relation avec leur altitude (m) pour 391 stations pluviométriques réparties dans les pays Andins	p.5
Graphique 2 : Représentation de la section transversale amont	p.33
Graphique 3 : Représentation de la section transversale aval	p.34
Graphique 4 : Mesure de l'aire des sections transversales (exemple du 5 Juin 2014)	p.35
Graphique 5 : Courbe de tarage pour la méthode volumétrique	p.38
Graphique 6 : Courbe de tarage pour la méthode incomplète	p.39
Graphique 7 : Courbe de tarage avec comparaison des deux méthodes volumétrique et incomplète	p.40
Graphique 8 : Courbe de tarage utilisant les deux méthodes volumétrique et incomplète	p.41
Photo 1 : Etat du barrage à mon arrivée le 10/03/2014	p.7
Photo 2 : Elargissement du cours d'eau par érosion des berges causée par la destruction du barrage	p.7
Photo 3 : Matériels de mesures utilisés dans le cadre de l'observation des précipitations	P.9
Photo 4 : Flotteur (bouteille) utilisé pour la mesure de la vitesse du courant	p.11
Photo 5 : Ancien barrage utilisé par Anna Li-MARCHETTI, aujourd'hui détruit	p.16
Photo 6 : Barrage actuel	p.16
Photo 7 : Traversée du Rio Puyo	p.16
Photo 8 : Installation de la section transversale	p.17
Photo 9 : Mesure de vitesse du courant au sein de la station de mesure grâce aux flotteurs	p.18

Photo 10 : Brouillard en milieu forestier au sein du parc autour de 7h	p.24
Photo 11 : Présence de gramalote dans la partie amont du bassin versant	p.28
Photo 12 : Partie aval du bassin versant reforestée	p.28
Photo 13 : Affleurement rocheux du poudingue fluvial	p.28
Photo 14 : Affleurement argileux (à droite)	p.28
Photo 15 : Bois en amont de la source	p.29
Photo 16 : La source du cours d'eau « Los Yapas » (Zone humide)	p.29
Photo 17 : Partie enterrée du cours d'eau	p.29
Photo 18 : Débordement du barrage le 02/06/2014 (hauteur d'eau à la section transversale amont = 67cm)	p.32
Photo 19 : Période de basses eaux le 26/06/2014 (hauteur d'eau à la section transversale amont = 33 cm)	p.32
Photo 20 : Etat de la station de mesure le 15/05/2014	p.34
Tableau 1 : Présentation des pluviomètres et de leurs caractéristiques	p.10
Tableau 2 : Exemple du 23/04/2014 récolté pendant un événement pluvieux	p.20
Tableau 3 : Représentation de plusieurs journées ayant la même quantité de précipitations : 2,271L/m ² + ou – la marge d'erreur	p.21
Tableau 4 : Evolution des précipitations au cours de 5 jours consécutifs pour les pluviomètres 1, 2 et 3	p.22
Tableau 5 : Représentation de la moyenne journalière des précipitations perçues pour les pluviomètres 1,2 et 3 sur une période totale de 97 jours	p.22
Tableau 6 : Moyenne journalière des précipitations inférieures à 1 l/m ²	p.23
Tableau 7 : Moyenne journalière des précipitations du 07/04/2014 au 14/07/2014	p.25
Tableau 8 : Moyenne journalière des précipitations pour les journées recevant moins de 1 l/m ²	p.25
Tableau 9 : Echelle granulométrique de WENTWORTH (1922)	p.31
Tableau 10 : Mesure de débit par méthode volumétrique en l/s. Comparaison des résultats obtenus en bouchant ou non l'un des tubes	p.32
Tableau 11 : Mesure du débit total (l/s) par addition des moyennes de chaque tube	p.32
Tableau 12 : Mesure du temps (s) que met un flotteur pour traverser la station au cours de deux essais et selon l'emplacement des flotteurs au sein du cours d'eau	p.37
Tableau 13 : Présentation de différentes mesures de débit par méthode volumétrique pour des hauteurs identiques	p.38
Tableau 14 : Présentation de différentes mesures de débit par méthode incomplète pour des hauteurs identiques	p.39
Tableau 15 : Présentation de la comparaison des mesures de débit par méthode incomplète et volumétrique pour des hauteurs identiques	p.40

PRESENTATION DE L'ORGANISME

Historique et localisation du Parc

Le Parc Los Yapas se situe en Equateur, au sein du village de Fatima qui se trouve à 7,42 km de Puyo, capitale du canton de Pastaza. Fatima se situe au point de latitude 01°24'40'' S et de longitude 77°00'00'' O. Le Parc se trouve dans la zone frontalière entre la forêt humide tropicale amazonienne et la zone montagneuse andine. Il est à une altitude de 1000 m et les températures assez constantes se situent entre 18°C et 24°C (GOBIERNO PARROQUIAL DE FÁTIMA, 2011, p32). A ses origines, le terrain correspondait à une forêt primaire tropicale qui a été déboisée dans les années 60 pour suivre une politique agricole d'élevage dans la région. Lors de sa création en 2007, le parc avait pour vocation de créer une propriété familiale vouée à servir de projet de reforestation. Les terres acquises à cette époque, d'une superficie de 25 ha, étaient recouvertes de plantes invasives utilisées pour l'élevage, nommées « gramalote ». Le projet de reforestation a suivi plusieurs étapes. Aujourd'hui 12 ha sur 25 ha sont reforestés. Le parc comprend un Orchidarium/Bromelarium, des surfaces destinées à l'Agroforesterie et à la culture de plantes médicinales. Le parc est parcouru de plusieurs sources et cours d'eau, un regroupement d'étangs, de nombreux sentiers... (« <http://losyapas.com/> » consulté le 20/03/2014)

Les enjeux du parc

L'enjeu du parc est avant tout un projet de reforestation. Plusieurs points décrivent cet enjeu:

Environnementaux :

Le projet de reforestation a pour objectif de restaurer la biodiversité en réintroduisant des espèces floristiques provenant de la forêt amazonienne primaire. Dans le même temps, ce projet permet de lutter contre l'érosion, l'appauvrissement des sols et la réduction des périodes de sécheresse grâce à la récupération de sources d'eau.

Scientifiques :

Le Parc est un lieu d'expérimentation scientifique afin de répondre à différents objectifs :

- la recherche de moyens/solutions pour résoudre les problèmes rencontrés au sein du Parc. Ainsi le rapport écrit par Florine DAVI, étudiante au Master 2 ERE, a entre autres pour buts de mettre en place des systèmes expérimentaux afin de trouver des moyens de lutte contre les ravageurs sévissant dans les cultures situées en agroforesterie.

- l'amélioration des connaissances de la zone. Cela permet aussi de mettre en évidence les impacts causés par la reforestation. Par exemple, le rapport d'Anna LI-MARCHETTI avait pour objectif de montrer les impacts de la reforestation sur la biodiversité avec la mise en place d'un protocole de la mesure de l'abondance et de la diversité des papillons et libellules, ainsi qu'un protocole sur la mesure de débit d'une rivière.

Educatifs/touristiques :

Le Parc accueille des volontaires et des étudiants afin de réaliser des projets scientifiques dans le but d'observer l'influence de la reforestation mais aussi afin de réaliser des formations en agroforesterie... Le Parc est inscrit dans le parcours touristique d'une agence qui promeut les projets innovants en termes de protection environnementale. C'est grâce à cette agence que des classes d'étudiants viennent visiter le parc dans le cadre de voyages scolaires. Avec ces deux points, le parc est en mesure de mettre en place des méthodologies afin d'observer l'évolution du projet de reforestation et de pouvoir les présenter notamment aux touristes.

Economiques :

Le revenu provient de différentes activités :

- Accueil de touristes et de volontaires ;

- Vente de produits naturels sous formes d'huiles essentielles à partir de plantes médicinales cultivées dans le Parc ;

Les fruits et légumes produits dans le Parc sont réservés à la consommation des volontaires et des touristes. La famille AGUILAR utilise également ses propres revenus pour l'amélioration et le développement du Parc.

Sociaux :

6 employés sont des ressortissants du village de Fatima et certains d'entre eux résident dans le Parc.

INTRODUCTION

Ce rapport a été rédigé dans le cadre du Master 2 Espace Rural et Environnement à l'Université de Bourgogne. Il porte sur le stage d'une durée de 5 mois et demi, effectué du 06/03/2014 au 19/08/2014, au sein du Parc botanique Los Yapas situé à Fatima (Equateur), dans le cadre de la participation à un projet de reforestation. Ce stage a été encadré par Madame Gabriela AGUILAR, gérante du parc.

Ce rapport correspond à la suite d'un suivi préalablement débuté par Anna LI-MARCHETTI (ancienne étudiante du Master 2 ERE) au sein de ce même parc en 2013 pendant une durée de 5 mois. Son projet a porté sur la récupération de sources d'eau grâce à la reforestation mais aussi à la mise en place d'une méthode de suivi d'espèces indicatrices tels que les papillons et les libellules. Il avait pour objet l'observation des possibles modifications apportées par la reforestation.

Ce projet de reforestation est innovant dans un contexte mondial actuel de déforestation. Le travail effectué par Anna LI-MARCHETTI a permis d'établir l'état de la biodiversité de papillon et libellules au sein du Parc, 6 ans après sa création. Ses études, afin de permettre d'observer l'influence de la reforestation doivent être réalisées sur le long terme d'où la nécessité de continuer son travail.

Les différentes missions effectuées par Anna LI-MARCHETTI ont été reprises au sein de ce stage. Cependant, le présent rapport portera plus particulièrement sur le suivi et la proposition de l'amélioration méthodologique de la mesure du débit d'un cours d'eau afin de voir l'influence de la reforestation sur le cours d'eau. En parallèle, d'autres méthodologies seront proposées afin de vérifier l'influence de cette reforestation au sein du Parc Los Yapas et notamment un suivi sur les précipitations observées. Il permettrait dans le futur de connaître le temps de réponse du cours d'eau après un événement pluvieux, un élément important sur lequel la reforestation peut avoir un impact. Un des éléments étudié à partir des méthodologies mise en place sera l'effet de la reforestation sur le débit pendant les périodes sèches lorsque les cours d'eau ont tendance à diminuer drastiquement.

Face au faible revenu circulant au sein du Parc toutes les méthodologies présentées devront être choisies de manière à ce que le Parc puisse subsister économiquement.

Dans le futur, ce rapport aura également dans le futur le but de montrer le rôle bénéfique de la reforestation. Cela dans l'espoir de pouvoir encourager la population à poursuivre d'autres projets de reforestation dans la région et d'autres régions.

Ce projet de reforestation aura un impact sur la biodiversité, les sols, l'eau. La question des moyens d'études à employer se pose dans ces termes :

- Quelles sont les méthodologies employées pour observer l'influence de la reforestation sur la récupération de sources d'eau ?
- Comment les mettre en place de manière simple et avec des moyens financiers réduits, tout en ayant des résultats fiables?

Pour répondre à ces questions fondamentales permettant le recueil de données et l'exploitation des résultats à des fins d'interprétation, nous proposons le déroulement suivant :

- Dans un premier temps, nous présenterons l'état actuel du Parc quant à l'avancement de son projet de reforestation ; l'influence de la forêt et de la reforestation sera évoquée par rapport à la littérature scientifique, pour comprendre leur impact sur les débits et les précipitations ainsi que sur les méthodologies appliquées au sein du Parc pour les mesurer.
- Dans un second temps, toujours dans le but de vérifier l'influence de la reforestation sur les précipitations et les débits, le choix méthodologique sera expliqué selon trois critères : simplicité de la mise en œuvre, réduction des coûts, performance.
- Cela permettra, dans un troisième temps, de dégager les premiers résultats résultant de ces choix méthodologiques, en recourant à la littérature existante sur le sujet pour interpréter les résultats. Nous proposerons également de nouvelles solutions et améliorations méthodologiques selon les résultats obtenus.

I) CONTEXTE ACTUEL/ETAT INITIAL

I.1) Etat actuel de la reforestation/déforestation

I.1.1) A l'échelle mondiale

Entre 1990-2005, à l'échelle mondiale, la perte de surface forestée a été de 1,7% pour une estimation de 3,8 milliards d'hectares de forêts présents en 2005 (« <http://www.fao.org/forestry/fra/fra2010/fr/> » consulté le 06/07/2014). La déforestation peut s'expliquer par de nombreux facteurs, principalement surtout d'origine humaine :

- Augmentation de la population,
- Augmentation des besoins en bois de chauffage, papeterie, meubles...,
- Croissance des villes,
- Transformations de zones forestières en terres agricoles,
- Accès à des zones pétrolières...

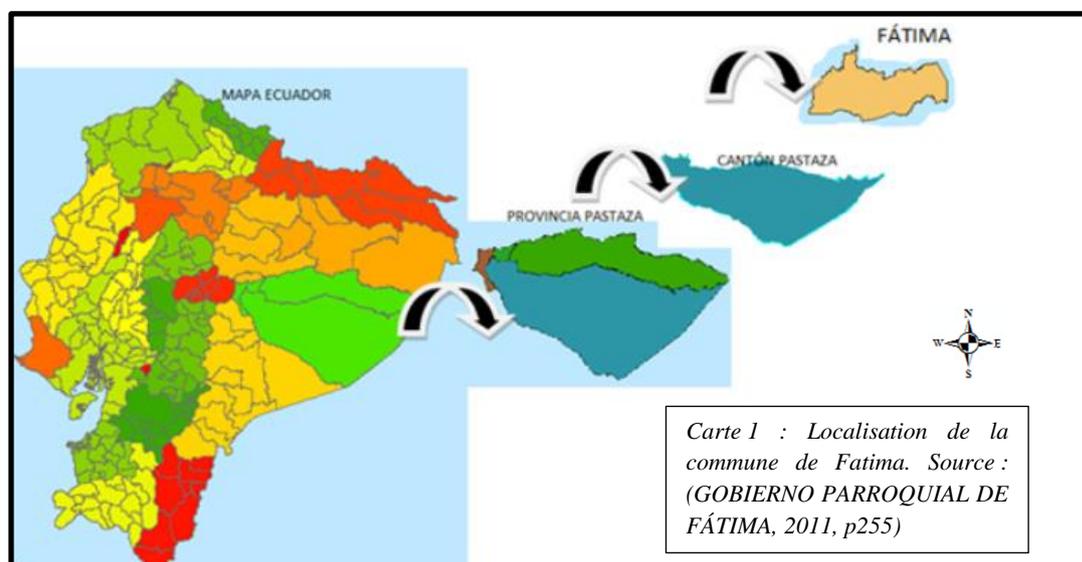
Cependant le rythme de la déforestation n'est pas uniforme et change selon les régions de la planète. Ainsi dans les régions d'Asie et d'Amérique du Nord, ce sont les seuls endroits où la forêt a gagné du terrain entre 1990 et 2005 avec notamment un gain de 1,4 millions d'hectares pour l'Asie (LINDQUIST E.J. et al., 2012).

I.1.2) A l'échelle de l'Amérique Latine et de l'Equateur

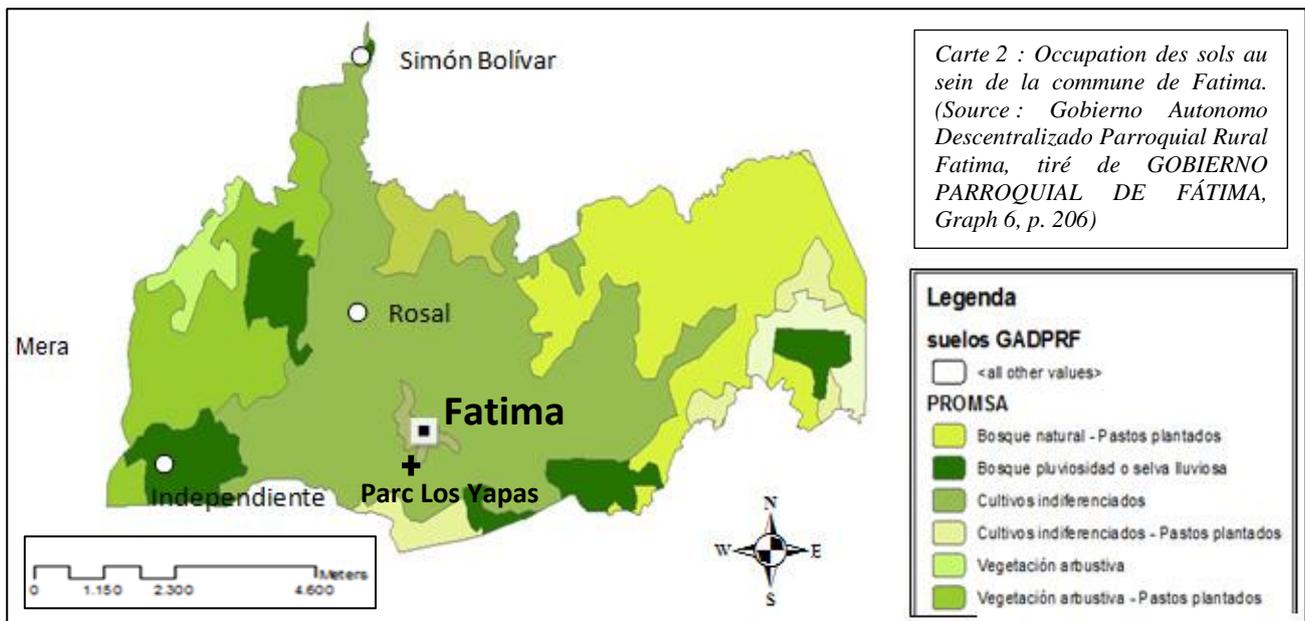
En Amérique Latine la forêt a perdu 2,8 millions d'hectares par an entre 1990 et 2000 et 4,3 millions d'hectares par an entre 2000 et 2005 (LINDQUIST E.J. et al., 2012).

L'Equateur est le seul pays d'Amérique Latine qui a vu sur la période de 1990 à 2010, son taux de déforestation augmenter passant de -1,53% de 1990 à 2000 à -1,89 de 2005 à 2010 (« <http://www.fao.org/forestry/fra/fra2010/fr/> » consulté le 06/07/2014).

I.1.3) A l'échelle de la région de Puyo



Le canton de Pastaza (Carte 1) où se situe Puyo et Fatima est particulièrement touché par la déforestation puisqu'il est situé à la frontière avec la forêt tropicale. Cette région a suivi, dans le passé, une politique d'expansion agricole empiétant alors sur la forêt tropicale. Aujourd'hui, la « Révolution Ciudadana » (Révolution Citoyenne), mise en place par le gouvernement, prend la relève en transformant les anciennes terres agricoles en lotissements et pavillons. Cela a pour conséquence une dégradation de la qualité des eaux par les rejets urbains, une érosion des terres... Au sein de la commune de Fatima, de 93 km² (Carte 2), on obtient aujourd'hui 60% de pâturages et cultures, 35% de forêt secondaire et 5% de forêt primaire (GOBIERNO PARROQUIAL DE FÁTIMA, 2011, p. 43).



Traduction de la légende de la carte concernant les sols :

- Vert-jaune : forêt naturelle – pâturages plantés
- Vert foncé : forêt pluviale
- Vert moyen : cultures indifférenciées
- Jaune clair : cultures indifférenciées – pâturages plantés
- Vert très clair : végétation arbustive
- Vert brillant : végétation arbustive – pâturages plantés

I.1.4) Dans le Parc

Aujourd'hui plusieurs questions se posent au sujet de l'évaluation scientifique concernant l'évolution de la reforestation, et de son impact sur la biodiversité, le climat, la rétention en eau des sols... Certaines zones du Parc ont été replantées il y a plusieurs années, ce qui permet d'obtenir une vision de l'avancée de la reforestation. D'autres zones du Parc n'ont cependant toujours pas été replantées.

Face à un projet d'extension du Parc dans des zones de différentes altitudes (4000 m, 1000 m...), les protocoles mis en place dans ce rapport permettront d'être retranscrits dans les projets d'extension.

Pour de plus amples renseignements sur l'état actuel de la reforestation/déforestation et de leurs effets dans le monde, la Partie 1 intitulée « la reforestation et la ressource en eau : contexte et enjeux » (pp. 2-17) du rapport d'Anna LI-MARCHETTI (2013) peut être consultée. Elle met notamment en évidence les conséquences de la déforestation sur les pertes de la biodiversité et l'érosion des sols mais aussi les bénéfices de la reforestation sur les sols, l'eau, les biens et sur l'enjeu social.

I.2) La relation reforestation/précipitations

I.2.1) Apports bibliographiques

Aujourd'hui, de nombreux rapports mais aussi de nombreuses personnalités aussi bien politiques, scientifiques ou encore les habitants des régions concernées affirment le lien qui existe entre la déforestation en milieu équatoriale et l'apparition de sécheresse.

Le lien entre la baisse des précipitations et la hausse des températures causée par la déforestation est une idée partagée et observée pour tous les pays en milieu équatorial et cela quel que soit le continent (DESCROIX et al., 2005, p. 223). Ainsi SHUKLA et al. en 1990 et NOBRE et al. en 1991 (cité par ESPINOZA J.C. et al, 2010, p. 102) montrent que la déforestation provoque un rallongement des saisons sèches. De plus, SILVA DIAS et al. en 2002, toujours cités par ESPINOZA J.C. et al., montrent que les fortes pluies, au cours des périodes sèches, diminuent également.

Au Mexique, le gouverneur de l'État de Mexico, en janvier 2002, a déclaré que chaque arbre adulte produit 8000 l d'eau par an. Le Ministre de l'Environnement de ce même gouvernement, Mr LICHTINGUER, était convaincu que l'on peut remplir les aquifères et barrages grâce à des projets de reforestation. Le représentant du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural pour l'État de Durango a dénoncé la déforestation comme le premier facteur de sécheresse dans la région, affirmant que la forêt est vitale pour générer de l'eau (GAMBINO S., 2000). Lors d'une étude effectuée par ANDREASSIAN V. en 2002, il a démontré que le lien entre la forêt et l'hydrologie avait déjà été observé depuis

l'Antiquité. Cette même étude il cite Bernardin de SAINT PIERRE en 1787 au sujet de l'actuelle Ile Maurice : « *L'attraction végétale des forêts est si bien d'accord avec l'attraction métallique des pitons de ses montagnes, qu'un champ situé en lieu découvert, dans le voisinage, manque souvent de pluie, tandis qu'il pleut presque toute l'année dans les bois qui n'en sont pas à une portée de fusil* ».

Plus récemment, ESCOURROU G. (1981) met en évidence le phénomène du ralentissement de la vitesse du vent causé par la présence de forêts. Cela induirait, selon lui, une ascendance forcée de l'air et par conséquent l'intensité des pluies. Il ajoute que la reforestation a permis d'augmenter de 6% les précipitations à certains endroits, ce phénomène étant visible surtout pendant les années sèches.

Néanmoins, BRUIJNZELL L.A., chercheur à l'Unesco, rapporte en 1990 que d'autres études effectuées dans les climats tropicaux humides et tempérés ont conduit à la conclusion que la forêt n'a pas de conséquence sur la pluviométrie locale ; il ajoute également que les résultats contraires qui ont pu être avancés manquent pour la plupart par la faiblesse des données sur lesquelles ils reposent.

Cependant, les simulations effectuées plus récemment affirment l'impact de la reforestation sur le climat. Ainsi les simulations faites par le modèle sur la circulation générale atmosphérique (AGCM : Atmospheric general circulation model) prévoient ainsi que la déforestation complète de la forêt amazonienne entraînerait des changements climatiques (DURIEUX L. et al., 2003). Des études menées au sein même de la forêt Amazonienne, au Brésil, ont déjà montré des résultats. Elles ont permis de confirmer les simulations avec une perception du changement climatique provoqué par la déforestation de 15% de la forêt primaire convertie en terre agricole. Ces études ont montré que les changements observés sur les couvertures nuageuses situées au-dessus des zones déforestées ne présentaient pas de variations significatives à l'échelle interannuelle. Cependant, à l'échelle saisonnière et diurne, les variations sont perceptibles. Ainsi la déforestation entraînerait l'accentuation des phénomènes de saisonnalité. Alors que CHEN F. et AVISSAR R. en 1994; AVISSAR R. et LIU Y. en 1996 ; WANG J. et al. en 2000; DURIEUX L. et al. en 2003 cités par ESPINOZA J.C et al. (p. 102), modélisent une augmentation des pluies pendant les saisons sèches, causée par une augmentation de l'albédo dans les zones déforestées qui provoqueraient des phénomènes de convergences et convections au sein des zones déforestées; ELTAHIR E.A.B. et BRAS R.L., en 1994, signalent une diminution de la pluviométrie dans le même temps.

Grâce à l'utilisation de données observées, LAVABRE J. et ANDREASSIAN V. (2000) affirment que la forêt a un impact significatif sur le climat local, notamment grâce à un albédo plus faible (BALDOCHI D.D. et al., 1985 ; KOTODA K., 1989 ; BERGER A., 1992 ; WALLACE J.S. et OLIVIER H.R., 1990 ; SHUTTLEWORTH W.J., 1988), conduisant alors à une évapotranspiration plus forte.

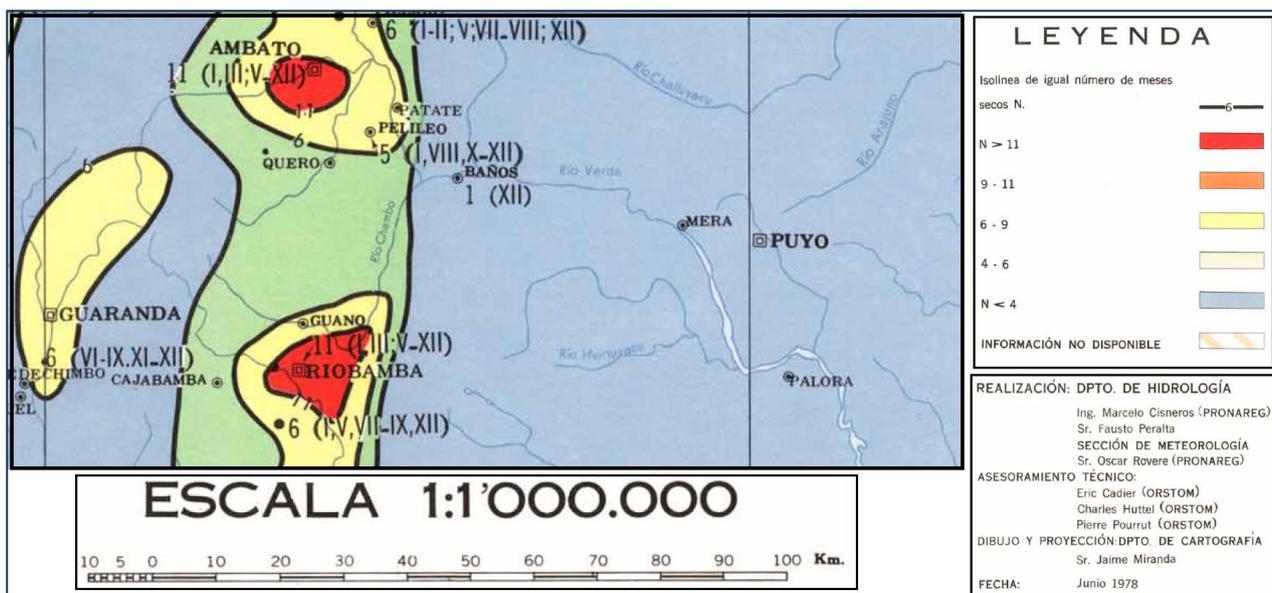
Pendant ce stage, lors de la participation à une session de cours de permaculture effectué à Lago Agrio, Javier CARRERA, professeur en permaculture, affirmait que la pluviométrie dans les zones forestées de l'Equateur recevait plus de précipitations que dans les zones déforestées de cette même région ; cette affirmation a été appuyée par les nombreux agriculteurs présents à ce cours (40 participants), qui ont pu observer ce phénomène au sein même de leurs exploitations.

I.2.2) Climat en Equateur et dans la région du parc Los Yapas

L'Equateur se situant où l'angle du soleil est le plus fort durant toute l'année, l'énergie solaire perçue ne varie que très peu au cours de l'année. Par conséquent, les températures mensuelles restent uniformes tout au long de l'année et il n'est pas possible de définir de saisons climatiques pour cette région. Cependant, il existe des périodes humides et sèches. Ainsi, on retrouve les périodes les plus humides de mars à octobre, lorsque le soleil forme un angle perpendiculaire très prononcé. En effet, lorsque le soleil est le plus vertical, l'évaporation est maximale et des nuages se forment, qui donneront des précipitations abondantes. A l'inverse, lorsque le soleil forme un angle moins prononcé, l'énergie reçue est moindre, l'évaporation diminue ainsi que les précipitations. Cela entraîne alors des périodes plus sèches (Fries A, *Estaciones climáticas en Ecuador*).

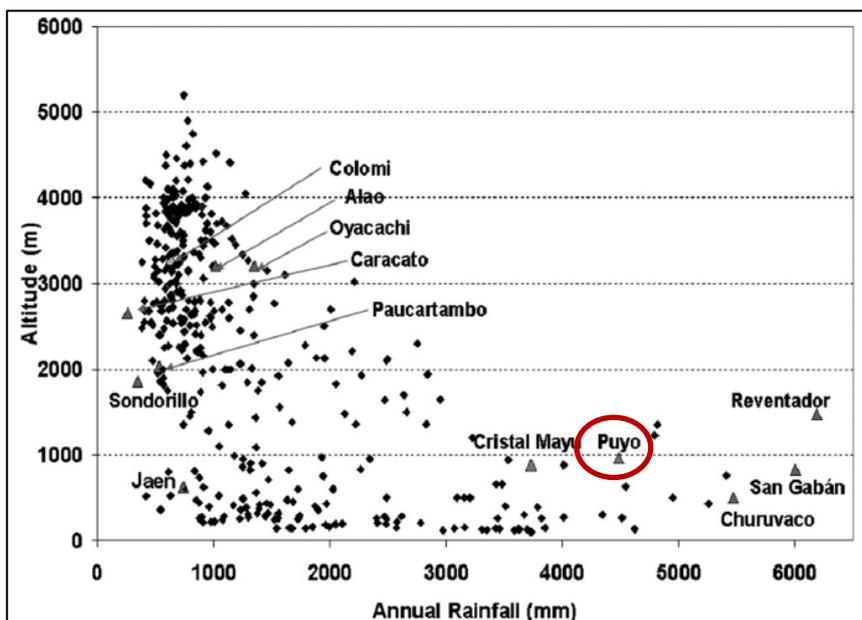
Les forêts, qui contribuent fortement à l'évaporation, vont avoir un rôle majeur sur les précipitations.

Le parc Los Yapas se situe dans la région nommée « El Oriente », correspondant à un cycle climatique annuel typique des régions équatoriales : elle reçoit moins de 4 mois secs, c'est-à-dire moins de 4 mois durant lesquels l'évapotranspiration potentielle mensuelle est supérieure aux précipitations récoltées durant cette même période (Carte 3).



Carte 3 : Extrait de la carte représentant le nombre de mois secs au cours de l'année pour l'Equateur

La région de Pastaza en Equateur est une des régions les plus pluvieuses au monde. Puyo, une ville située à 7 km du parc Los Yapas, reçoit 4500 l/m² (mm) par an, pour une température uniforme autour de 22°C (Graphique 1). Par conséquent, le lieu semble idéal pour étudier la pluviométrie. Par comparaison, la ville de Dijon en France a reçu 760 mm (l/m²) par an sur la période de 1981 à 2010 (« <http://www.meteofrance.com/climat/france/dijon/21473001/relevés> » consulté le 13/05/2014).



Graphique 1 : Présentation des précipitations totales annuelles (mm) en relation avec leur altitude (m) pour 391 stations pluviométriques réparties dans les pays Andins (tiré de ESPINOZA VILLAR J.C. et al., 2010, fig3, p. 107)

I.2.3) Cas du Parc Los Yapas

Au sein du Parc, aujourd'hui, aucune étude n'a été réalisée afin de montrer l'impact de la reforestation sur les précipitations. Cependant, Anna LI-MARCHETTI a réalisé des entrevues en 2013 au sein de la population de la commune de Fatima où se situe le Parc Los Yapas. D'après ces entrevues, la famille la plus ancienne habitant la commune a perçu les changements au sein de la zone durant les 50 années précédentes. A l'origine recouverte par la forêt, celle-ci a été peu à peu déforestée pour y être remplacée par des pâturages. Cette famille affirme que, lors de ce changement ils ont vu les précipitations diminuer, ainsi que le débit des cours d'eau. Aujourd'hui, suite à ces observations, cette famille a décidé de laisser repousser les arbres de manière naturelle. Cependant, la majeure partie de la population ne voit pas le lien existant entre la présence de la forêt et les sources d'eau. Comme il a été vu précédemment, de nombreuses sources d'information provenant de rapports scientifiques, ou d'enquêtes auprès des populations locales montrent une influence de la forêt sur les précipitations et les périodes de sécheresse à petite échelle.

Face aux conditions climatiques de la région favorables pour ce type d'étude, il a été décidé de lancer une expérimentation simple et peu coûteuse afin de voir si l'impact de la reforestation sur les précipitations peut s'observer à l'échelle du Parc Los Yapas. L'étude a également eu pour but d'obtenir des éléments de réponse sur les éventuelles observations que l'on obtiendra lors de l'étude du débit du cours d'eau Los Yapas.

I.3) La relation reforestation/débit

I.3.1) Apports bibliographiques

L'influence de la reforestation et des forêts sur la mesure des débits est assez ambiguë, avec des résultats différents selon les climats.

Dans le passé, l'idée commune reprise par les politiques liées à l'eau et aux forêts, était que la forêt constituait le meilleur couvert végétal pour maximiser le rendement en eau, régulariser les flux saisonniers et garantir une bonne qualité de l'eau (CALDER I. et al., 2007, p. 3). Ainsi, il a été écrit que la forêt augmentait le volume des écoulements, causés par des pluies plus abondantes, dans le cas des immenses forêts d'Europe et d'Asie centrale (BOCHKOV A.P., 1959, 1970 ; KRESTOVSKY O.I. et FEDOROV S.F., 1970 ; VED I.P., 1978 cité par COSANDEY C., 2006, p. 318).

Cependant des études effectuées en hydrologie forestière dans les années 80-90, montre des résultats différents (résumés par BRUIJNZEEL L.A., 2004 ; CALDER I.R., 2005, 2007 ; VAN DIJK A.I.J.M. et KEENAN R., 2007 cité par CALDER I. et al. 2007). Elles montrent alors que l'action bénéfique qu'aurait le couvert forestier amont sur les flux annuels et saisonniers d'aval s'est souvent révélée erronées. Ainsi l'étude réalisée en Guyane française par FRITSCH J.M. en 1992, a montré, concernant l'écoulement de l'eau, que la déforestation serait à l'origine de son augmentation causée par une diminution de la percolation de l'eau dans le sol, une diminution de l'interception de l'eau par le feuillage et une augmentation du ruissellement superficiel qui n'est plus freiné par la végétation.

Cependant, la diminution de la percolation de l'eau dans le sol, c'est-à-dire la modification des caractéristiques d'infiltration du sol, semble dépendre de la nature du déboisement telle que l'utilisation d'engins lourds... (BRUIJNZEEL L.A., 1991 cité par KESTENS Y., 2000, p. 6).

De plus, l'augmentation du rayonnement incident causé par la déforestation tend à augmenter l'évaporation au sol, entraînant donc une baisse de l'écoulement au sol (KESTENS Y., 2000, p. 5).

Par conséquent le résultat global de l'écoulement dépend de nombreux facteurs, après que la déforestation ait été effectuée. Il semblerait alors, qu'après l'évènement, le débit total a tendance à augmenter. Cependant en période sèche, la situation est variable avec notamment, une diminution des débits en période sèche, d'autant plus que les sols ont été affectés (KESTENS Y., 2000 p. 7).

A l'inverse, le reboisement de zones de cultures ou de friches entraîne généralement une réduction de l'apport d'eau total, indiquant que l'évapotranspiration au sein du couvert végétal l'emporte sur l'infiltration (BRUIJNZEEL L.A., 1991 cité par KESTENS Y., 2000, p. 7).

En outre, il est scientifiquement démontré que, dans les écosystèmes tropicaux, le rôle de protection du couvert forestier d'amont, contre les crues saisonnières en aval, a souvent été surestimé. Cela est particulièrement vrai dans le cas de phénomènes majeurs intéressant de grands bassins versants ou hydrographiques (FAO et CIFOR, 2005).

Par conséquent, après la déforestation d'une zone, il existe de nombreux facteurs influençant l'écoulement au sol et le débit des cours d'eau. Cela peut expliquer les différences observées entre chacune des études effectuées sur le sujet. D'autant plus que le facteur temps est un élément important à prendre en compte lors de ces études : il faut un certain temps, c'est-à-dire plusieurs années, avant que le système ayant subi la déforestation se mette à l'état d'équilibre. Il est donc important que l'étude se réalise jusqu'à ce stade d'équilibre. En parallèle, les projets de reforestation sont aussi soumis à ces nombreux facteurs, mais le temps d'étude est encore plus long. En effet, il faut des dizaines d'années avant que la forêt n'atteigne son état d'équilibre. Dans notre cas, l'étude du débit du cours d'eau Los Yapas, lors de la reforestation, nous permettra de voir si en période sèche, la forêt y joue un rôle de régulateur. L'étude en parallèle de la pluviométrie nous permettra d'obtenir des éléments d'explications quant aux résultats obtenus, sur les débits.

I.3.2) Cas du Parc Los Yapas

Grace à son projet de reforestation, le parc désire montrer les avantages du projet et les enseigner à la population afin que celle-ci suive également cet exemple. Dans le cadre du lien entre la reforestation et le débit, le Parc a déjà entrepris des mesures méthodologiques et scientifiques afin de les observer lors d'une première phase d'expérimentation effectuée par Anna LI-MARCHETTI, en 2013. Ce rapport correspond à la deuxième phase de cette expérimentation.

I.3.2.1) Méthodologie de mesure de débit

L'approche de la reforestation en relation avec le débit d'un cours d'eau au sein du parc a déjà été abordée. Des mesures de débits ont pu être effectuées en 2013 par Anna LI-MARCHETTI. La méthode présentée dans son rapport est une

méthode volumétrique correspondant à l'utilisation d'un récipient. Cette technique est efficace pour des cours d'eau à faible débit ; or, pour plusieurs raisons il n'a pas été possible, avec la méthode présentée par Anna LI-MARCHETTI, de fournir des données à intervalles réguliers ou même continus. Cela s'explique par :

- des débits trop importants en périodes de fortes pluies (incapacité à mesurer au seau),
- des problèmes techniques : cela nécessite la présence d'un technicien de manière régulière ; or, pour se rendre sur le lieu, il est nécessaire de traverser une rivière parfois rendue impraticable par des pluies trop importantes.

Cependant, bien voir l'impact de la reforestation nécessite un suivi sur le long terme. En effet, la reforestation suit une évolution lente qu'il est nécessaire de suivre tout au long de son processus afin de vérifier son impact. Ces protocoles ont été choisis selon les moyens et temps fournis à l'époque de leur création. De ce fait, certains de ces protocoles peuvent aujourd'hui être améliorés ce qui fera l'objet de ce rapport.

Il est à noter que l'ouvrage utilisé par Anna LI-MARCHETTI en 2013 pour faire les mesures de débits selon la méthode volumétrique, a été détruit avant le début de la deuxième phase d'expérimentation en raison de facteurs tels que les forts débits en période de crue, un manque d'entretien et l'érosion des berges (Photos 1 et 2).



Photo 1 : Etat du barrage à mon arrivée le 10/03/2014

Photo 2 : Elargissement du cours d'eau par érosion des berges causée par la destruction du barrage

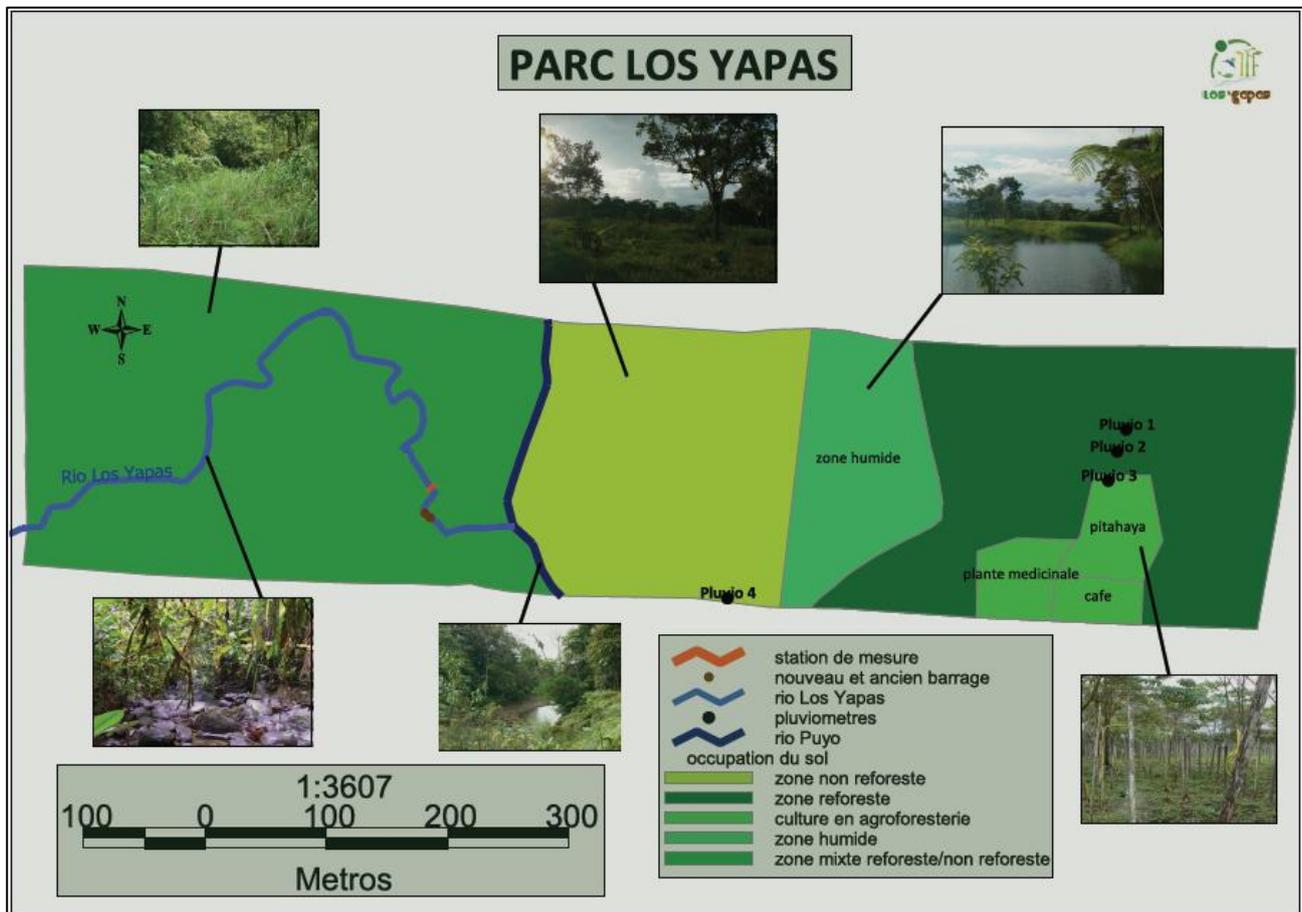
I.3.2.2) Etat des connaissances du bassin versant lors de l'étude d'Anna LI-MARCHETTI

Dans l'étude de la mesure de débit d'un cours d'eau, il est également important de connaître le bassin-versant. Or, dans le cas du cours d'eau étudié, ce dernier n'avait pas pu être caractérisé dans le rapport d'Anna LI-MARCHETTI pour différentes raisons telle que l'absence de carte MNT (Modèle Numérique de Terrain) de la région... De plus, la source du cours d'eau ainsi que sa partie amont, n'avaient pas été parcourues car elles se situent hors du Parc et aucune autorisation de la part des propriétaires de ces terrains n'avait été obtenue. C'est pour ces raisons qu'il a été décidé, au sein de ce rapport de trouver des solutions, afin de caractériser au mieux ce bassin versant (occupation des sols, localisation, surfaces...)

Par conséquent, de nombreuses études ont démontré les liens existant non seulement entre la reforestation et la pluviométrie, mais également avec les débits des cours d'eau. L'étude de la pluviométrie peut en partie expliquer les résultats des débits. Le climat de la région étant favorable à ce type d'étude, il a été décidé de poursuivre les études précédemment effectuées par Anna LI-MARCHETTI tout en les complétant et les améliorant. De nouvelles méthodologies ont aussi été mises en œuvre, afin de mieux comprendre l'influence de la reforestation sur les débits. La dimension concernant l'étude de la pluviométrie est un concept nouveau au sein du Parc et qui n'avait pas été abordé lors de l'étude précédente réalisée par Anna LI-MARCHETTI.

II) PROPOSITION DE SOLUTIONS/ METHODOLOGIES

L'enjeu est de trouver des méthodes et des solutions simples et peu coûteuses à appliquer au sein du Parc, afin qu'elles puissent être poursuivies par tout un chacun et qu'elles puissent rentrer dans le budget du Parc. Bien entendu, il était exigé, par ces moyens, d'obtenir des résultats fiables.



Carte 4 : Représentation du Parc Los Yapas et de son occupation du sol (réalisée par Sven MAURI)

II.1) Méthodologie utilisée dans le cadre de la relation reforestation/précipitation

II.1.1) Matériels utilisés

II.1.1.1) Pluviomètre

L'outil utilisé pour vérifier l'influence entre la reforestation et les précipitations obtenues au sein du Parc, est le pluviomètre. Il permet de mesurer les précipitations durant un intervalle de temps donné. Il se traduit, dans notre cas, par un entonnoir d'un diamètre de 29 cm, placé horizontalement. Il sert de récolteur des pluies. Un récipient sert à stocker l'eau récoltée. Une « grille » est présente au fond de l'entonnoir pour éviter toute occlusion par des insectes, feuilles ou autres obstacles. Le volume du récipient est adapté pour contenir l'équivalent de précipitations de plusieurs jours en cas de non disponibilité de techniciens pour procéder à la mesure, soit un volume de 6 l (Tableau 1). Le coût de notre installation nous est revenu à 5 dollars pour un entonnoir, soit un total de 20 dollars pour 4 entonnoirs. Le prix peut être moindre si l'on choisit des entonnoirs plus petits. Cependant, il est important de prendre les plus grands afin de pouvoir récolter le plus d'eau possible, ce qui a pour but de diminuer les risques d'erreurs de lecture sur les précipitations les plus faibles et d'obtenir des écarts de mesure entre chaque pluviomètre qui soient quantifiables. Le pluviomètre électronique permet un relevé en temps réel que l'on peut trouver pour un prix de 30 euros (« <http://www.rueducommerce.fr/m/ps/mpid:MP-7033AM231599#moid:MO-62A68M14973304> » consulté le 25/08/2014).

II.1.1.1.a) Installation du matériel

La surface réceptrice des précipitations est située à 1,50 m du sol, comme le préconisent les normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (1996) afin d'éviter les effets indésirables que peuvent créer les vents en hauteur. En effet, l'expérience conduite par MORELL M. en 1986 a montré que lors de fortes rafales de vent, l'angle d'incidence des pluies pouvait atteindre 80° par rapport à la verticale, ce qui pouvait alors fausser la quantité de pluie obtenue au sein du pluviomètre. Le support du pluviomètre est fabriqué sur place avec le bois disponible.

II.1.1.1.b) Récolte des données



L'intervalle de temps choisi pour la récolte des mesures est journalier (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/3C.htm#3.1.2> » consulté le 07/07/2014). Ici il est réalisé tous les jours à 7h. Il est effectué à l'aide d'une éprouvette de 500 ml graduée tous les 5 ml. En-dessous de 50 ml de précipitations il a été décidé d'utiliser une seringue d'une contenance de 20 ml, graduée tous les 0,5 ml, afin de mieux observer, grâce à une meilleure précision, les écarts de précipitations entre chaque pluviomètre (Photo 3). Le coût de ces appareils de mesure peut être considéré comme nul dans notre cas, car ils étaient déjà présents au sein du Parc dans le cadre de distillerie d'alcool de canne à sucre. Cependant, on peut trouver ce matériel pour un prix de 6 euros pour l'éprouvette (« <http://www.amazon.fr/500-Eprouvette-Gradu%C3%A9e-Plastique-Transparent/dp/B0092KI13C> » consulté le 25/08/2014) et 0,20 euros pour une seringue (« <http://www.lacompaniedesanimaux.com/seringue-20-ml-a-l-unite.html?gclid=CJjSw5DdrsACFU7MtAodmmsAhQ> » consulté le 25/08/2014)

Photo 3 : Matériels de mesure utilisés dans le cadre de l'observation des précipitations

II.1.2) Méthodologie

Au sein du Parc, plusieurs caractéristiques peuvent être étudiées. L'observation de l'influence du couvert arbustif a été suivie en mesurant les précipitations sous et au-dessus de ce couvert. Il a aussi été décidé d'examiner l'influence que peut avoir un sol recouvert de prairies sur les précipitations.

II.1.2.1) Observation des différences de précipitations au-dessus et en-dessous du couvert arbustif

Ce suivi a été retenu afin de déterminer la différence de précipitations que l'on peut observer au sol sous un couvert forestier, comparée aux précipitations réelles observées au-dessus des arbres. Cela permettra de mettre en évidence le phénomène d'évaporation et de rétention d'une partie des précipitations, qui s'effectue dans le couvert arbustif avant d'atteindre le sol, ainsi que les phénomènes d'écoulement de l'eau le long des troncs.

L'échantillon recueilli par le pluviomètre est toujours infime par rapport à l'ensemble de la pluie qu'il est supposé représenter sur une zone par nature étendue ; de plus, il est d'autant moins représentatif que la pluie sur la zone considérée est hétérogène (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/3C.htm#3.1.2> » consulté le 07/07/2014). Il est donc nécessaire, afin d'avoir une meilleure représentativité du couvert forestier, de placer plusieurs pluviomètres. Aussi, afin de vérifier les précipitations perçues sous le couvert forestier, deux pluviomètres ont été installés au sein d'une zone reforestée 7 ans auparavant, d'une superficie de 7,05 ha. Le dénommé pluviomètre 1 est situé sous un couvert composé de deux strates arbustives à 15 m et 10 m de hauteur. Le pluviomètre 2 est situé sous un couvert de trois strates arbustives à 15 m, 10 m et 7 m de hauteur. Ce choix a été réalisé dans l'optique d'avoir une meilleure représentation d'un milieu forestier et, par conséquent, de constater les disparités au sein même d'un couvert arbustif. Ces deux stations sont situées à 20 m l'une de l'autre (Carte 4).

Pour vérifier les précipitations au-dessus du couvert forestier, il a été choisi, pour une raison de simplicité et d'accessibilité, de déposer un pluviomètre au niveau d'une zone à découvert de la zone reforestée (culture en agroforesterie de Pitahaya) et à une distance suffisante des arbres pour que ces derniers ne puissent pas influencer les mesures. Ce pluviomètre s'appellera Pluviomètre 3. Il est situé à 45 m du pluviomètre 1 et à 25 m du pluviomètre 2 (Carte 4).

D'après la faible distance entre chacun des 3 pluviomètres et leur appartenance au même milieu arbustif, on assumera que la différence d'eau observée entre le milieu sous couvert et au-dessus du couvert forestier ne proviendra pas d'une quantité de précipitation différente, mais des propriétés du couvert forestier.

II.1.2.2) Observation des différences de précipitations au-dessus du couvert arbustif et en milieu prairial

Pour observer les précipitations au-dessus d'un couvert arbustif, nous utiliserons le même pluviomètre cité précédemment et qui se situe en dehors de l'influence du couvert arbustif mais dans la partie reforestée, le pluviomètre 3.

Afin de voir les précipitations dans une zone non reforestée, il a été choisi de placer le pluviomètre 4 au centre d'une zone de 7,01 ha au sein du Parc. Cette zone est composée de quelques étangs et ses sols sont recouverts de gramalote. Cette zone de 7,01 ha est en réalité bien plus grande, car nous devons prendre en compte les prairies de gramalote tenue également par les propriétaires voisins. Ainsi, en estimant les propriétés voisines aussi grandes que le Parc Los Yapas et recouvertes de gramalote, on obtient une zone de 50 ha. Au final, la zone non reforestée doit représenter, en tenant compte de la zone du Parc et des propriétés voisines, un espace de près de 57 ha.

nom	Pluvio 1	Pluvio 2	Pluvio 3	Pluvio 4
Coordonnées UTM	01°25.958 S / 077°59.999 O	01°25.968 S / 078°00.003 O	01°25.981 S / 078°00.007 O	01°26.034 S / 078°00.176 O
Altitude	entre 997 et 1010m			
déscription du pluviomètre	support en bois; relecteur situé à 1,50 m; relecteur de diametre 29 cm; récipient de capacité 6 l			
déscription du lieu	milieu forestier; sous le couvert arbustif; 2 strates arbustives	milieu forestier; sous le couvert arbustif; 3 strates arbustives	milieu forestier; lieu dégagé; représente la pluviométrie au-dessus du couvert arbustif	milieu prairial recouvert de gramalote
photos				

Tableau 1 : Présentation des pluviomètres et de leurs caractéristiques

II.2) Méthodologies utilisées dans le cadre de la relation reforestation/débit

II.2.1) Matériels utilisés

En règle générale, le matériel utilisé pour la mise en place de mesure de débit est assez coûteux. Or, en raison d'un budget limité, il a fallu trouver des techniques alternatives peu onéreuses et produisant des résultats convaincants.

II.2.1.1) Matériels utilisés dans le cadre de la description du bassin versant

II.2.1.1.a) GPS (Global Positioning System)



Le GPS utilisé est de marque MAGELLAN et appartient au modèle eXplorist 500. Il permet de procéder à la géolocalisation du parcours effectué, ou de géolocaliser des points d'intérêts. Il enregistre les coordonnées cartésiennes dans le système de projection UTM/UPS (Universal Transverse Mercator/ Universal Polar Stereographic) ainsi que les coordonnées géodésiques dans le système de coordonnées géographiques mondiales WGS 84 (World Geodetic System 1984). Les fichiers obtenus à l'aide du GPS sont des éléments « .upt ». Ce GPS a un prix de 346 euros (« http://www.activgps.com/Magellan-eXplorist-500_462.htm » consulté le 19/05/2014); il était déjà utilisé dans le cadre d'autres projets au sein du Parc.

II.2.1.1.b) Logiciel GPS utility (5.20)

Ce logiciel permet notamment de retranscrire les éléments « .upt » des GPS dans le format « .shp » qui est utilisable pour le logiciel GvSIG. C'est un logiciel gratuit avec un accès limité. Ainsi on ne peut lire et retranscrire les fichiers « .upt » contenant seulement un maximum de 100 points. Pour avoir accès à la version finale, il est nécessaire de s'enregistrer et de payer. Dans notre cas seul la version gratuite a été utilisée.

II.2.1.1.c) Logiciel GvSIG



C'est un logiciel gratuit permettant la gestion de données géographiques. Il permettra de lire les données récoltées par le GPS et d'offrir un rendu visuel.

II.2.1.2) Matériels utilisés dans le cadre de la mesure de débits

II.2.1.2.a) Limnimètre

Il permet de lire le niveau de l'eau d'un cours d'eau.

C'est un capteur :

- soit direct, qui mesure une distance,
- soit indirect, qui mesure une grandeur physique liée à la hauteur telle que la pression hydrostatique.

On ne verra, ici, qu'un exemple de limnimètre direct pour une raison de coût.

Il se présente sous la forme d'une échelle limnimétrique, c'est-à-dire une règle graduée tous les centimètres. Elle est le plus souvent en tôle émaillée (ROCHE M., 1963, p. 173) voire en mousse dure et est appelée mire limnimétrique.

Prix : Une mire limnimétrique de 2 m apparaît au prix de 150 € sur les sites internet les moins chers. (« <http://www.emaillerie-normande.com/product/fabrication-echelle-de-crue-limnimetrique-acier-emaille-niveau-de-riviere-mer> » consulté le 10/04/2014).

Dans notre cas, le limnimètre se présente sous la forme d'une tige en bois verticale de 2 m de haut graduée tous les demi-centimètres, et qui est placée au fil de l'eau de telle sorte que le zéro soit en contact avec le niveau le plus bas du cours d'eau.

II.2.1.2.b) Limnigraphe (« <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html> » consulté le 11/04/2014) ; M. ROCHE, 1963, pp. 174-175)

Cet appareil permet de lire et d'enregistrer en permanence la hauteur du niveau du cours d'eau. Il évite ainsi les lectures systématiques opérées par un technicien. Il existe plusieurs sortes de limnigraphes tels que :

- Le limnigraphe mécanique à flotteur, où un flotteur va suivre les fluctuations du niveau de l'eau avec une précision de 5 mm environ.
- Le limnigraphe à pression (ou « bulle à bulle ») sert à mesurer la pression de l'air injecté au fond du cours d'eau, la pression de l'air étant proportionnelle à la hauteur d'eau.

L'achat de cet outil est nécessaire afin de récolter des mesures de débit en continu. Sur internet, il a été trouvé des limnigraphes mécaniques à un prix de 200 euros sur le marché de l'occasion (« <http://dbhsarl.eu/forum/viewtopic.php?f=3&t=1025> » consulté le 28/04/2014). Aujourd'hui, ce matériel n'a toujours pas été acquis au sein du Parc.

II.2.1.2.c) Flotteurs



Les flotteurs sont utilisés afin de connaître la vitesse du courant au sein du cours d'eau. Les flotteurs utilisés correspondent à des flotteurs lestés afin d'avoir une idée de la vitesse non seulement en surface mais également en profondeur. Dans notre cas, les flotteurs sont artificiels et composés de bouteilles en plastique remplies de sable de manière à ce que celles-ci soient immergées au 4/5 du tirant d'eau (Photo 4). De plus, afin que le flotteur couvre au mieux les $\frac{3}{4}$ de la profondeur du cours d'eau, les bouteilles les plus longues ont été utilisées (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/5C.htm> » consulté le 13/11/2013).

Photo 4 : Flotteur (bouteille) utilisé pour la mesure de la vitesse du courant

II.2.1.2.d) Bassine

La bassine est utilisée pour mesurer les débits volumétriques à partir des tuyaux sortant du barrage. Cette bassine est la même que A. LI-MARCHETTI utilisait l'année précédente, cependant, pour des résultats plus fiables, le trait de jauge initialement placé à 40 litres a été porté à 53 litres. La contenance de la bassine va dépendre des débits que l'on rencontre dans le cours d'eau. Plus la bassine a un volume élevé, plus les résultats seront fiables.

II.2.1.2.e) Chronomètre

Le chronomètre permet d'évaluer le temps que met l'eau pour remplir la bassine ainsi que le temps que mettent les flotteurs pour atteindre une certaine distance le long d'une section du cours d'eau. Les chronomètres utilisés ont une précision au centième de seconde.

II.2.2) Description du bassin-versant

Afin d'étudier l'influence de la reforestation sur le débit du cours d'eau, il est essentiel de caractériser le bassin versant du cours d'eau étudié.

Il a été choisi de réaliser l'expérience sur un seul bassin versant dont le cours d'eau « Los Yapas » circule au sein du Parc Los Yapas et se jette dans une rivière plus grande, nommée Rio Puyo, toujours au sein du Parc. Sa source ne se situe pas dans le Parc. De ce fait, une partie de ce bassin versant est recouverte par les gramalotes et une autre partie au sein du Parc Los Yapas suit un projet de reforestation. Afin de voir l'influence de la reforestation, il faudrait alors suivre de manière continue et cela, sur le long terme, le débit du cours d'eau. Par manque de bassin versant modèle sur lequel se référer, on pourra présumer que les différences au cours du temps observé seront causées par la reforestation. On pourra néanmoins vérifier si les différences de débit ne sont pas causées par une différence générale du climat régional en regardant également les résultats des pluviomètres qui ont été mis en place au sein du Parc.

En temps normal, aujourd'hui, la détermination du bassin versant peut se réaliser avec l'aide d'un logiciel de SIG (Système d'Information Géographique) et l'utilisation d'une routine adaptée lorsque le MNT est à notre disposition. Or, pour notre région le MNT n'est pas disponible. Il a donc été choisi de cartographier le bassin versant à l'aide d'un GPS en suivant sur le terrain les courbes de niveau visibles. Le bassin versant étant le lieu où toutes les eaux se réunissent en un même point, nommé l'exutoire, le contour de ce bassin peut être tracé en suivant les points d'altitude les plus hauts. De la même manière, afin de caractériser l'occupation du sol du bassin versant, le GPS a été utilisé.

Pour définir la géologie du bassin versant, l'observation des affleurements et leurs descriptions ont été réalisées. Ne pouvant pas effectuer un repérage géographique précis de la géologie par manque de temps et de moyens, seule la description des roches a été menée à bien.

Afin de connaître une pente moyenne du bassin versant n'ayant pas de MNT, on peut réaliser la moyenne des pentes entre plusieurs points des extrémités du bassin versant et son exutoire. Pour connaître l'altitude de chacun de ces points et par conséquent pour trouver la pente, le GPS peut être utilisé.

II.2.3) Description du cours d'eau sur le lieu de la station de mesure

Afin de décrire le cours d'eau et dans le but d'identifier son faciès, de nombreuses caractéristiques peuvent être étudiées. Ainsi JOWETT I.G. en 1993 montre que certains auteurs privilégient des caractéristiques différentes pour différencier les cours d'eau : LEOPOLD L.B. et al. en 1964 ainsi que MOSLEY M.P. en 1982 s'intéressent surtout à la composition du substrat, ALLEN K.R. en 1951 préfère se baser sur la répartition des hauteurs et vitesses... D'autres éléments peuvent être étudiés telles que la pente de la ligne d'eau (YANG C.T., 1971 ; DELACOSTE M. et al., 1995), les caractéristiques de la surface de l'eau (MOSLEY M.P., 1982)...

Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à deux critères principaux:

- La hauteur d'eau moyenne,
- La vitesse d'écoulement moyenne.

Bien qu'il soit nécessaire d'observer ces deux variables pour un débit d'étiage moyen proche du débit moyen mensuel sec interannuel (MALAVOI J.R. et SOUCHON Y., 2001, p. 359), dans notre situation, ces variables ont pu être observées seulement sur une période de quelques mois et sur les données à faible débit récoltées.

Nous nous sommes intéressés dans un second temps au profil en travers et à la granulométrie. Par manque de temps notamment, nous n'avons pu relever les caractéristiques biologiques dans la description du cours d'eau.

II.2.4) Méthodologie afin de pouvoir mesurer le débit de manière continue : création d'une station hydrométrique

II.2.4.1) Choix de la méthode

La mesure d'un débit nécessite la connaissance de certaines caractéristiques du cours d'eau. Ainsi la formule du débit peut s'écrire de plusieurs manières différentes (ALDHEGERI M. p. 7 et p. 22):

Formule 1 :

$$Q = Sm \times U$$

$Q = \text{débit (m}^3/\text{s)}$
 $Sm = \text{séction mouillée (m}^2\text{)}$
 $U = \text{Vitesse (m/s)}$

Formule 2 :

$$Q = V \times T$$

$Q = \text{débit (m}^3/\text{s)}$
 $V = \text{Volume (m}^3\text{)}$
 $T = \text{Temps (s)}$

- S_m se traduit par l'aire de la section de mesure entre le fond du lit du cours d'eau et la hauteur du tirant d'eau et placé perpendiculairement à l'écoulement du cours d'eau. De ce fait, dans la prise en compte de la section mouillée, la hauteur du niveau d'eau H est également à intégrer.
- U correspond à la vitesse supposée constante à travers la section ; pour cet élément, il est donc également nécessaire de connaître la longueur L de cette section. (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/5C.htm> » consulté le 13/11/2013).
- V correspond à un certain volume que l'eau permet de remplir en un temps donné T .

Pour pouvoir connaître ces éléments, il est nécessaire de procéder à la création d'ouvrages, stations de mesures, l'installation de matériels...

Selon le choix de la formule de débit à utiliser, les méthodes suivies vont différer. Ainsi on distingue trois grandes catégories de méthodes permettant de déterminer les différents facteurs entrant en compte dans la formule du débit :

- Les méthodes globales telles que les méthodes volumétriques, seuils jaugeurs ou encore la dilution chimique. Pour ces méthodes, le débit est mesuré directement et il est possible d'appliquer la formule 2.
- Les méthodes complètes, telle que la méthode au moulinet, nécessitent de connaître les facteurs S_m , H , U , L . U correspond à la moyenne des vitesses obtenues sur la section mouillée du cours d'eau.

- Les méthodes incomplètes telles que l'utilisation de flotteurs ou de bateau mobile, utilisent les mêmes facteurs que la méthode complète ; cependant, le champ de vitesse y est exploré de manière partielle (FORRAY N. et al., 1998). La moyenne des vitesses obtenues est alors appelée « vitesse moyenne de surface » (V_{ms} exprimé en m/s). Par conséquent, la formule 1 change sensiblement en y rajoutant un coefficient K de correction. Il permet de connaître la vitesse moyenne dans toute la section de la surface au fond du lit du cours d'eau. Ce coefficient doit se déduire à partir des mesures de débit Q et de vitesse moyenne de surface (V_{ms}) effectuées avec la méthode complète.

On obtient alors la formule 1 appliquée à la méthode incomplète :

$$Q = K \times V_{ms} \times S_m$$

Tel que $K = U/V_{ms}$ calculé à partir de la méthode complète.

Cependant, s'il n'est pas possible d'effectuer des mesures par méthode complète afin de connaître le coefficient K , il est possible d'utiliser des valeurs existantes dans la littérature et qui sont fonction de l'état du cours d'eau (ALDHEGERI M. p. 22).

Comme le signale ALDHEGERI M. (p. 153), le choix du matériel est fonction des conditions hydrauliques dans l'écoulement à mesurer, mais également des moyens financiers dont on dispose. Il ajoute alors qu'il faut très souvent se contenter du matériel disponible et « d'essayer de faire au mieux ».

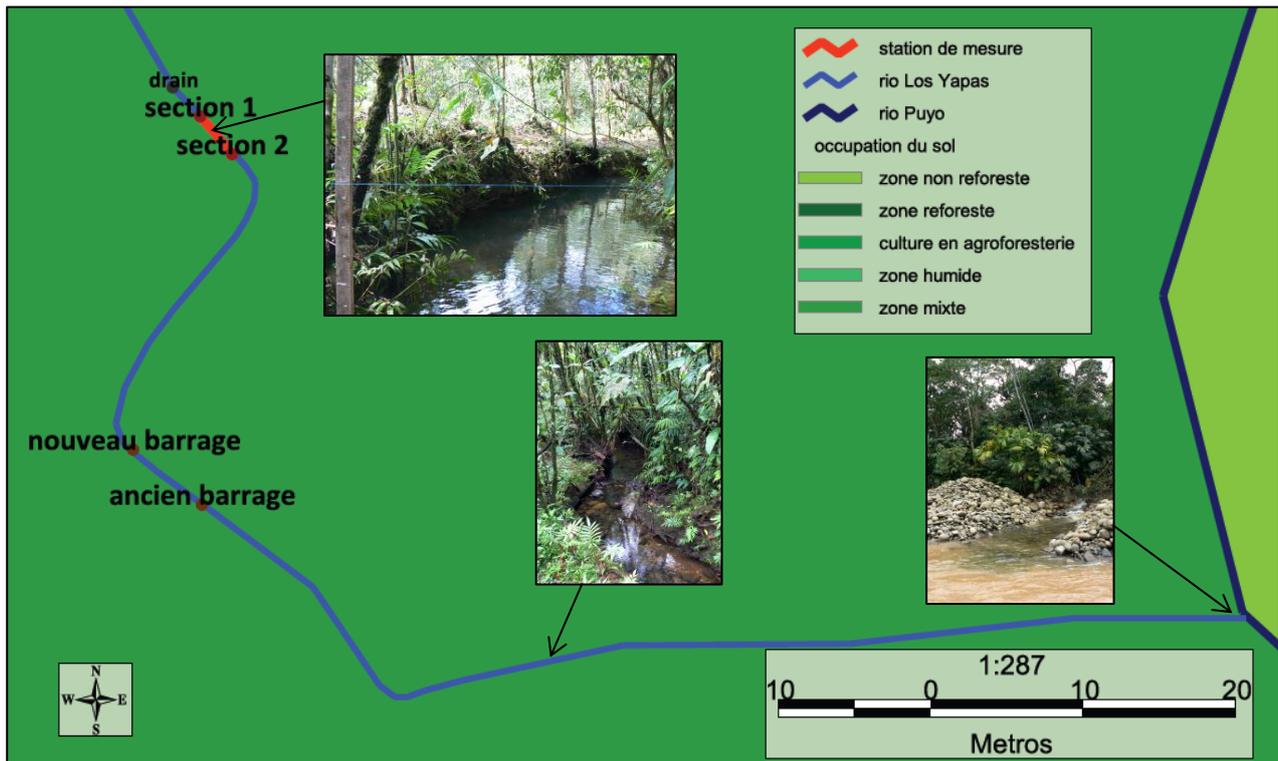
Dans notre cas, il a été choisi de réaliser deux méthodes peu coûteuses, cela afin de vérifier leur acuité entre elles, mais également afin de pouvoir mesurer des débits supérieurs à ce qui était réalisable durant l'année 2012-2014 dans le cadre du rapport d'Anna LI-MARCHETTI.

Les méthodes retenues sont donc :

- la méthode incomplète utilisant le flotteur utilisé généralement pour des débits moyens à faibles,
- appuyée de la méthode globale volumétrique utilisée pour des débits plus faibles.

Enfin ALDHEGERI M. (p. 23) ajoute que, réalisés dans de bonnes conditions, les jaugeages aux flotteurs donnent de bons résultats et ils doivent être utilisés chaque fois que les méthodes classiques ne peuvent pas être mises en oeuvre.

II.2.4.2) Mise en place de la méthode



Carte 5 : Présentation des installations nécessaires à la mesure des débits (réalisé par Sven MAURI)

La mise en place de ces méthodes a nécessité la réalisation de plusieurs étapes :

II.2.4.2.a) Pose du limnimètre

Il faut qu'elle respecte, au mieux, plusieurs règles quant à son installation:

Nous avons placé le limnimètre de telle sorte que le point zéro de l'échelle se situe au niveau le plus bas des basses eaux, afin d'éviter des lectures de valeurs négatives (« <http://echo2.epfl.ch/edrologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html> » consulté le 11/04/2014).

Il faut également que la partie supérieure de l'échelle limnimétrique soit plus haute que les plus hautes eaux du cours d'eau. Pour cela, nous avons utilisé une échelle de 2 m d'après l'observation du niveau de l'eau lors de crues précédentes.

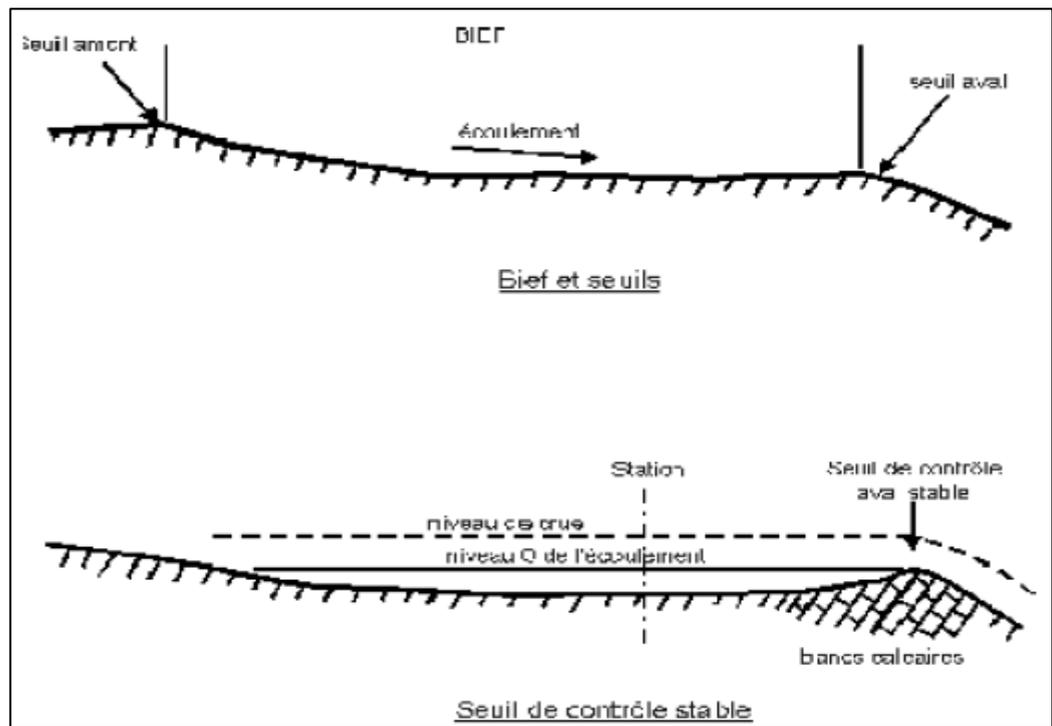
Tous les ans, il faut vérifier l'état du niveau zéro de l'échelle par rapport au niveau le plus bas du lit du cours d'eau.

Pour ces raisons, l'emplacement du limnimètre doit être choisi avec précaution :

- Il faut tout d'abord que l'emplacement choisi soit en adéquation avec la station de mesure de débit : aucune entrée ni sortie d'eau du cours d'eau ne doit se dérouler entre la station limnimétrique et la station de mesure de débit que ce soit en période d'étiage ou de crue. Dans notre cas la station limnimétrique se situe au niveau de la section de mesure de débit.

- Il faut trouver une section dont l'écoulement soit sous contrôle, c'est-à-dire dont le niveau d'eau soit un indice stable du débit (JACCON G., 1987). Il faut pour cela que la section où se situera le limnigraphe se place entre deux seuils, l'un amont, l'autre aval. Le seuil aval doit alors permettre une élévation du niveau d'eau en fonction du débit. Lorsqu'un seuil de ce type existe il est appelé seuil de contrôle (Figure 1). Dans notre cas un seuil de contrôle artificiel a été construit.

Figure 1 : Description d'un seuil de contrôle (tiré de G. JACCON Manuel d'hydrométrie ORSTOM - Tome V - Tracé de la courbe de tarage et calcul des débits, 1987)



Il faut également que le limnimètre soit placé dans une zone peu influencée par le ressaut et, par conséquent, il faut éviter, lors de la lecture de la mesure, de lire sur la face amont du limnimètre (ALDEGHERI M., 1979, p. 165) (Figure 2).

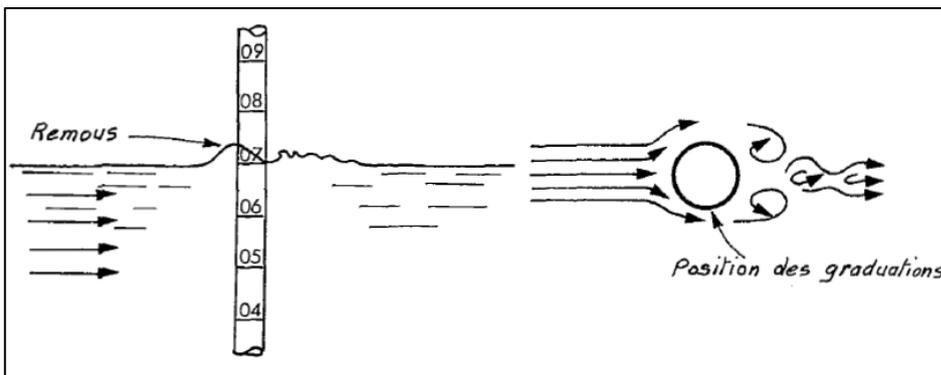


Figure 2 : Représentation des erreurs de lectures causées par un mauvais placement des graduations du limnimètre au fil du courant (M. ALDEGHERI 1979, fig 45, p. 191)

II.2.4.2.b) Création d'un seuil de contrôle artificiel

La création d'un contrôle artificiel peut se caractériser par la création d'un barrage le long du cours d'eau. Celui-ci permettra de concentrer les eaux pendant les périodes d'étiage et cela, afin que le limnimètre en amont puisse observer plus facilement des hausses ou baisses de niveau causées par les variations de débits. (RICARD J., 2002, p. 20)

La construction de l'ouvrage doit suivre les règles suivantes:

- Ne pas créer de remous pouvant gêner la prise de mesures ;
- Construire l'ouvrage afin que les conditions d'écoulement « aval », causé par exemple par l'arrivée d'un affluent, ne puisse pas gêner la prise de mesures.

Il faut savoir que, sur certains cours d'eau, des contrôles naturels telles que des petites chutes d'eau peuvent remplir le même rôle que les contrôles artificiel et, dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'en construire.

Bien qu'il existe des petites chutes le long du cours d'eau, il a été choisi de construire ce contrôle artificiel de telle sorte qu'il puisse également servir à mesurer les débits lorsqu'ils sont faibles.

II.2.4.2.c) Création d'une méthode de mesure en période de faible débit

La méthode choisie est celle utilisée par Anna LI-MARCHETTI. L'ancien barrage utilisé par A. LI-MARCHETTI a été détruit au cours de l'année précédente et il a été contourné par le cours d'eau en détruisant les berges par érosion (Photos 1 et 2). Il était anciennement composé de pierres et tissus imperméables (Photo 5). Il a été nécessaire d'en

reconstruire un, 10 mètres en amont, là où le lit du cours d'eau, un peu plus étroit, paraissait moins sujet à l'érosion (Carte 5). Pour éviter d'autres risques d'érosion des berges et la destruction du barrage, les berges ont soigneusement été consolidées à l'aide des pierres récupérées dans le lit du cours d'eau en aval. Le barrage en lui-même est composé d'une cage grillagée à la dimension de la largeur du lit du cours d'eau. Cette cage est remplie de pierres. De la terre, des débris végétaux, du sable et des tissus imperméables ont également été ajoutés afin de colmater les fuites possibles (Photo 6).

La méthode de mesure de débit est dite volumétrique, c'est-à-dire qu'elle permet de déterminer le débit directement en vérifiant en combien de temps l'eau parvient à remplir un récipient d'un volume prédéfini. De ce fait, cette méthode ne peut s'appliquer qu'à de faibles débits pouvant aller de quelques litres à quelques dizaines de litres par seconde (JACCON G., 1987). Cette technique est mise en place à l'aide de deux tuyaux d'un même diamètre traversant le barrage (le même qui sert de contrôle artificiel).

La prise de mesures s'effectue avec l'aide de deux techniciens, le premier tenant la bassine et s'assurant de son bon remplissage, et l'autre est chargé de débiter et arrêter le chronomètre selon les indications du premier technicien.



Photo 5 : Ancien barrage utilisé par Anna Li-MARCHETTI, aujourd'hui détruit



Photo 6 : Barrage actuel

II.2.4.2.d) Choix de la station de mesure

C'est au sein de cette station que sont effectuées les mesures afin d'obtenir le débit à partir de la méthode incomplète des flotteurs.

Accessibilité au site : il est nécessaire de marcher 20 minutes afin d'atteindre le site au sein du Parc. Les chemins sont parfois glissants et il est nécessaire de traverser une rivière nommée « Rio Puyo » pour accéder au site (Photo 7). La traversée de cette rivière se fait à pied et est rendue impraticable pendant les fortes pluies. Cette traversée est rendu d'autant plus difficile en raison du caractère très mobile du lit de cette rivière. Ainsi, il a été observé, pendant ce stage, un banc de blocs rocheux atteignant 2 m de haut sur une longueur de plus de 20 m, disparaître au cours d'un unique évènement pluvieux. Un projet de tyrolienne a été évoqué pendant la durée de mon stage afin de pouvoir traverser en période de haute eau le Rio Puyo ; cependant le projet n'a pas abouti.



Photo 7 : Traversée du Rio Puyo

Comme l'indique J.A. RODIER lors du Colloque International sur l'Hydrométrie en 1970, en région tropicale, les débits de basses eaux étant souvent très faibles, il est préférable de procéder, avant d'effectuer des mesure de débit, à des travaux d'aménagement au sein de la station de mesure afin que l'écoulement soit le plus régulier possible.

Pour pouvoir comparer les débits obtenus avec la méthode volumétrique et la méthode incomplète des flotteurs, il a été nécessaire de placer la station de manière à ce qu'aucune entrée ni sortie d'eau ne s'effectue entre cette station et le barrage servant à calculer le débit volumétrique. En raison d'un drain placé 35 m en amont du barrage, il s'est révélé nécessaire de placer la station entre le barrage et ce drain.

Le choix de placer la station en amont du barrage, s'explique par la nécessité, pour celle-ci de se trouver également sous l'influence de la montée de l'eau crée par ce barrage. En effet, la station devant permettre aux flotteurs de circuler, il a fallu assurer un niveau d'eau minimal pour que des bouteilles puissent flotter. Ainsi, avant la création du barrage, le lit du cours d'eau était impraticable pour les bouteilles du fait d'une trop faible hauteur d'eau, l'émergence de cailloux et rochers hors de l'eau. De plus, cela facilite la lecture du niveau d'eau par le limnimètre comme expliqué précédemment. Le choix de la station doit être également adapté pour que la longueur du tronçon soit égale à deux fois sa largeur (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/5C.htm> » consulté le 13/11/2013). Dans notre cas, la station mesure 4 m de longueur pour 2 m de largeur en général. On peut également se fier à la vitesse du courant en choisissant un

tronçon permettant un chronométrage minimum de 50 secondes (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/5C.htm> » consulté le 13/11/2013). Cependant un autre ouvrage recommande un temps de 20 secondes (O.M.M., 1994, p. 156). Dans notre situation, pendant notre période d'étude, ce temps a varié de 292,72 à 17,18 secondes selon que l'on se trouvait en période de faible ou fort débit.

La station doit également suivre un tracé le plus rectiligne possible (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/5C.htm> » consulté le 13/11/2013). Dans notre cas, la station présentait initialement un très légère courbure qui a été corrigée en « érodant » une partie de l'intérieur de cette légère courbe pour combler l'extérieur de la courbe, afin de rendre les berges de la station les plus parallèles possible.

Il faut que l'écoulement soit le plus régulier possible, sur une longueur suffisante : 10 fois ou 5 fois la largeur de la rivière (RODIER J.A., 1970, p. 5). Cependant, comme le font remarquer, en 2001, MALAVOI J.R et SOUCHON Y., les cours d'eau naturels présentent toujours des alternances de faciès (et, par conséquent, des alternances de vitesse et de hauteur d'eau) y compris dans leurs parcours les plus rectilignes.

Il est également préférable de placer la station de telle sorte que le lit du cours d'eau soit le plus stable possible (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/5C.htm> » consulté le 13/11/2013). Bien qu'à certains endroits du cours d'eau la roche mère soit visible (poudingue) ; le lit du cours d'eau est constitué de blocs rocheux et de sable dans la portion dans laquelle la station a dû être effectuée.

Il est nécessaire que la pente du lit soit constante, c'est-à-dire qu'aucune chute ou zone de rapides ne se situe au sein de la station de mesure (ALDEGHERI M., 1979, p. 228). Dans notre cas, cette condition est respectée.

La végétation étant très présente sur ce tronçon, il a fallu dégager certains endroits pour assurer une meilleure visibilité, une meilleure accessibilité et un meilleur passage des flotteurs (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/5C.htm> » consulté le 13/11/2013).

Il est important de signaler que les conditions citées précédemment sont à respecter le mieux possible mais qu'un tronçon idéal existe rarement (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/5C.htm> » consulté le 13/11/2013).

II.2.4.2.e) Section transversale

La section transversale correspond à la section plane d'un cours d'eau perpendiculaire à la direction de l'écoulement (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/4C.htm#4.1> » consulté le 07/07/2014).

L'aire des sections transversales au sein de la station de mesure va permettre de connaître les sections mouillées S_m utilisées pour la mesure des débits. La section transversale doit donc être choisie de manière à ce que sa hauteur soit supérieure au niveau du tirant d'eau pendant les périodes de crues. Afin de connaître leurs aires, nous avons tiré un fil de sorte que celui-ci soit perpendiculaire au courant et qu'il soit suffisamment haut pour qu'il ne soit pas submergé lors de crues. A l'aide d'un niveau à bulle, il est nécessaire de s'assurer que le fil soit bien installé (Photo 8). Une fois le fil tendu, on mesure, tous les 20 cm le long du fil, la hauteur entre ce même fil et le fond du lit du cours d'eau (Figure 3). Ces mesures nous permettent ensuite de connaître l'aire de la section. D'après ALDEGHERI M. (p. 234), en 1979, la mesure de l'aire de deux sections transversales est suffisante pour ensuite pouvoir mesurer les aires des sections mouillées.



Photo 8 : Installation de la section transversale

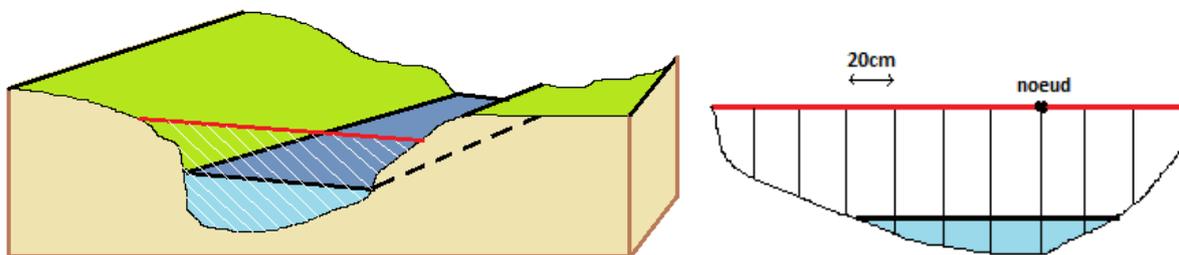


Figure 3 : Présentation d'une section transversale délimitée par la bordure rouge et une section mouillée délimitée par le tirant d'eau (en noir) ; (réalisé par Sven MAURI)

II.2.4.2.f) Section mouillée (S_m)

A chaque mesure de débit, il est nécessaire de connaître l'aire de la section mouillée dans le cadre de la formule 1. La surface libre au sein d'une station de mesure de débit peut présenter, si la pente de fond n'est pas continue, des hauteurs différentes entre chacune de ses sections mouillées selon que l'on est en débit de hautes ou basses eaux. Ainsi en haute eau, la surface libre du cours d'eau est généralement plus régulière qu'en période de basses eaux où le profil de la surface libre prend une allure plus brisée équivalente au lit du cours d'eau (Figure 4). De ce fait, nous utilisons un

limnimètre pour mesurer à chaque opération le niveau d'eau le plus profond de chaque section. Pour repérer le point le plus bas de chaque section, il a été placé un indicateur. Dans notre cas, c'est un nœud le long du fil qui fait office de repère pour la prise de mesure de l'aire de la section mouillée (Figure 3). A partir de la connaissance de l'aire des sections transversales, il est simple de connaître pour chaque mesure de débit, l'aire de la section mouillée, après avoir préalablement mesuré la hauteur d'eau de chaque section mouillée grâce au limnimètre. Après la création d'une formule dans le logiciel Excel, il suffit de rentrer la hauteur d'eau pour connaître la valeur de l'aire. Comme l'indique ALDEGHERI M. (p. 234), la section mouillée retenue pour le calcul du débit sera la moyenne obtenue à partir des deux sections mouillées amont et aval.

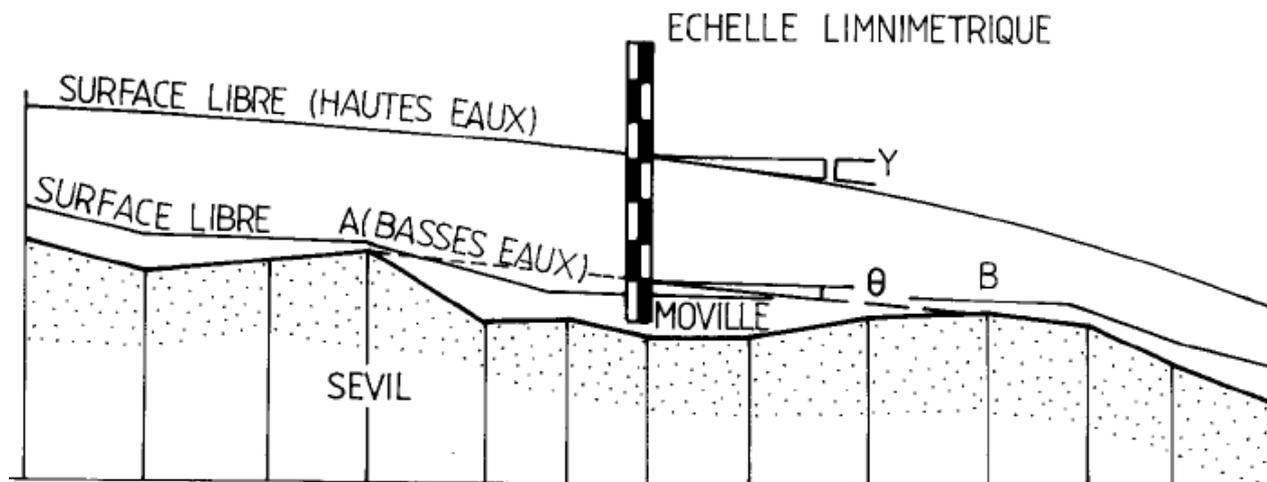


Figure 4 : Profil en long (tiré de G. JACCON, 1987)

II.2.4.2.g) Proposition d'une mesure de vitesse moyenne - méthode incomplète par flotteur

Pour caractériser le débit du cours d'eau, il est nécessaire de connaître sa vitesse (voir Formule 1 au II.2.4.1).

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la vitesse moyenne au sein d'une station.

La méthode complète utilise le moulinet correspondant à l'exploration de la section en différents points. Dans notre cas, c'est la méthode incomplète qui a été retenue. Plusieurs raisons expliquent ce choix :

- tout d'abord pour son prix nettement inférieur à celle utilisant le moulinet. En effet, le matériel est coûteux (7308 euros sur « http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/02/INFORME-DE-RENDICI%C3%93N-DE-CUENTAS-2012_Final-Firmado.pdf » consulté le 10/07/2014), tandis que la mise en place de la méthode des flotteurs est gratuite ;
- la disponibilité des moulinets n'était pas assurée dans notre cas sur toute la période de mesures,
- enfin le site, déjà difficile d'accès, aurait été encore moins aisé à rejoindre avec le transport d'un matériel aussi onéreux tel que le moulinet.



Photo 9 : Mesure de vitesse du courant au sein de la station de mesure grâce aux flotteurs.

La vitesse d'écoulement n'est jamais uniforme au sein d'une section transversale d'un cours d'eau (« <http://echo2.epfl.ch/ehydrologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html> » consulté le 11/04/2014). Pour obtenir une estimation la plus proche de la réalité de la vitesse au sein de la section, deux techniques ont été employées. Tout d'abord, les bouteilles les plus grandes ont été utilisées pour explorer au mieux la vitesse depuis le fond du cours d'eau jusqu'à sa surface. Enfin, pour explorer le champ de vitesse sur la largeur du cours d'eau, et afin de voir l'influence des ralentissements causés par l'approche des berges, plusieurs mesures ont été réalisées à plusieurs reprises pour chaque mesure de débit. Ainsi, à chaque estimation du champ de vitesse on divise la largeur du cours d'eau par 4 et l'on y place les flotteurs. On a donc 4 mesures le long de la largeur du cours d'eau. Ce choix dépend entre autres des caractéristiques du cours d'eau, de l'homogénéité du lit et de la pente des berges. Ici, la faible largeur en général de ce cours d'eau ne nous permet pas de réaliser plus de 4 mesures. Pour s'assurer de la véracité des résultats, chacune de ces mesures est effectuée à deux reprises. Ce sont finalement 8 mesures de vitesse qui sont ainsi réalisées pour chaque mesure de débit à l'aide de la méthode incomplète par flotteurs.

Pour effectuer une mesure du temps que met le flotteur pour parcourir la station de mesure, on place le flotteur en amont de la station, puis on déclenche le chronomètre une fois que le flotteur passe le début de la station. On arrête le

chronomètre lorsque le flotteur atteint la fin de la station. Afin de mieux caractériser le début et la fin de la station, des fils perpendiculaires au courant y ont été tendus (Photo 9).

Comme il est difficile de mesurer la distance que parcourt chaque flotteur pour chaque mesure de temps effectuée, la distance parcourue par les flotteurs au sein de la station est estimée à partir d'un ensemble de mesures qui a été réalisé entre le début et la fin de la station.

Pour chacune des mesures de vitesse, on attribue donc une unique distance provenant de la moyenne des différentes mesures de distances effectuées entre les limites de la station. Cette distance a été évaluée à 4 m.

II.2.4.2.h) Création de la courbe de tarage

La courbe de tarage correspond à la mise en évidence de la relation qui existe entre la hauteur d'eau et le débit du cours d'eau au sein de la station de mesure (« <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/6C.htm> » consulté le 13/03/2014). La mise en place de la courbe de tarage est importante puisqu'elle permet de déduire, à partir de cette courbe, quel débit on obtient en observant uniquement la hauteur d'eau.

Dans notre cas, à chaque mesure de débit effectuée, que ce soit par la méthode volumétrique ou la méthode incomplète aux flotteurs, on leur a associé la hauteur d'eau observée grâce aux limnimètres situés au niveau de la section transversale amont.

Selon ALDEGHERI M. dans le tome IV du manuel d'Hydrométrie, pour effectuer une courbe de tarage il est nécessaire de réaliser 10 ou mieux 15 jaugeages répartis sur toute l'amplitude de variation de la hauteur d'eau.

Ainsi, après l'établissement de cette courbe, l'installation d'un limnigraphe permettra de connaître le débit en temps réel à partir de l'observation de la hauteur d'eau.

Par conséquent, les méthodologies appliquées ont nécessité peu de moyens financiers grâce à l'exploitation au mieux et au maximum du matériel déjà disponible au sein du Parc, ainsi qu'en utilisant des logiciels libre et gratuit. Au final le coût pour le parc de l'ensemble des méthodologies durant ma période d'étude s'élève à 20 dollars, soit 15 euros.

De plus, les méthodologies sont très simples à réaliser. La main d'œuvre maximale nécessaire a été de 2 personnes afin d'effectuer les mesures de débit. La partie la plus complexe a correspondu à l'exploitation des données sur des logiciels spécifiques pouvant nécessiter plusieurs heures de formation.

Enfin, afin d'obtenir des résultats fiables, deux méthodologies ont été appliquées en parallèle pour mesurer les débits ce qui permettra de comparer les résultats entre eux et de contrôler la fiabilité de ces deux méthodes.

III) RESULTATS/INTERPRETATION

III.1) La relation reforestation/précipitation (Annexe 2)

III.1.1) Marge d'erreurs

Il existe plusieurs sources d'erreurs, dont certaines peuvent être quantifiables et d'autres s'avérer beaucoup plus difficiles à évaluer : dans ce cas, elles n'ont pas pu être quantifiées.

La précision de l'instrument de mesure constitue une première source d'erreur. Pour récolter l'eau dans chaque pluviomètre, il a été choisi d'utiliser une éprouvette de 500 ml graduée à partir de 50 ml, tous les 5 ml. 5 ml correspondent à une marge d'erreur de plus ou moins 0,076 l/m² (ou mm), soit, ici, avec un récolteur de diamètre de 29 cm.

Pour les volumes d'eau récoltés inférieurs à 50 ml, il a été utilisé une seringue de 20 ml, graduée tous les 0,5 ml, c'est-à-dire offrant une marge d'erreur de plus ou moins 0,0076 l/m² (ou mm).

D'autres sources d'erreurs peuvent être notées telle que la perte d'eau effectuée lors de chaque transvasement entre le récolteur de pluie et l'appareil de mesure. Cette source d'erreur augmente d'autant plus que la valeur limite de l'appareil de mesure (500 ml ou 20 ml) est dépassée. Cette source d'erreur n'est pas quantifiable mais peut être considérée comme négligeable car les mesures au cours desquelles des pertes se déroulent sont annulées. Dans notre cas, sur la période totale étudiée aucune perte n'a été rapportée.

Une autre source d'erreur correspond à l'eau qui « reste » dans le récipient et qui ne peut pas être transvasée dans l'appareil de mesure. Cette source d'erreur va uniquement influencer les mesures à l'échelle journalière, car cette quantité est récupérée la journée suivante avec les nouvelles quantités d'eau récoltées. Il faut également faire attention à l'eau qui reste dans l'appareil de mesure et qui peut donc fausser les mesures des pluviomètres suivants. Le fait de secouer l'appareil et de le sécher avec un chiffon entre chaque mesure des différents pluviomètres, permet de réduire ces erreurs.

III.1.2) Pertinence du choix de l'échelle de temps de mesures

Les résultats obtenus ont été récupérés de manière journalière. Dans notre cas, assez rapidement, il a été observé que cette échelle de temps choisi n'était pas forcément la plus adaptée. En effet, pendant la récolte des données, le temps mis pour aller d'un pluviomètre à un autre est de plusieurs minutes. Ainsi entre le premier pluviomètre P1 - le plus près - et le dernier pluviomètre P4 - le plus éloigné -, il faut compter près de 25 minutes. Ce laps de temps a pour conséquence, lorsque la prise de mesures se déroule pendant un événement pluvieux, de fausser les données à l'échelle journalière, du jour prélevé et du jour suivant. On ne peut donc pas comparer les données de chaque pluviomètre entre elles pendant ces événements.

Ainsi, durant cette période, l'ordre des pluviomètres selon la quantité d'eau récoltée est le suivant :

P1<P2<P3<P4

Tableau 2 : Exemple du 23/04/2014 récolté pendant un événement pluvieux

	jour	semaine	mois
	23/04/2014	21/04 au 27/04	07/04 au 04/05
P1 (l/m ²)	8,175	12,636	11,203
P2 (l/m ²)	10,749	15,611	11,623
P3 (l/m ²)	11,355	14,748	11,628
P4 (l/m ²)	12,414	13,782	11,289
Marge d'erreur	0,076		

On peut voir, dans le Tableau 2, que lors d'une récolte effectuée pendant un événement pluvieux, la quantité perçue dans les pluviomètres correspond bien à l'ordre de leur récolte: P1<P2<P3<P4

Or ces résultats ne reflètent pas les données récoltées tout au long de la semaine et du mois où l'on observe :

P1<P4<P3<P2

Dans notre cas, lorsque ces événements se produisaient, nous avons décidé de récolter le pluviomètre après l'évènement pluvieux, quitte à attendre 1 à 2 heures et obtenir au final une récolte sur une durée d'un peu plus de 12 h. Cependant, pour résoudre totalement ce problème, il faudrait effectuer un relevé automatique des données pour chaque pluviomètre au même instant. Un pluviographe pourrait faire ce travail.

III.1.3) Source de manque de données

Au cours des semaines, on a pu observer des pluies très fortes dépassant ainsi les volumes maximum des récipients des pluviomètres : ceci a rendu inutilisables les données de la journée. Elles ont donc été invalidées et n'ont pas été prises en compte.

Ainsi le 11/05/2014, en moins de 12 h les pluviomètres de capacité initiale 3,78 l ont été remplis, indiquant des précipitations de plus de 57 l/m² pour cette période de temps. Afin que cela ne se reproduise plus, il a été décidé d'utiliser des récipients plus grands d'une contenance maximale de 6 l.

Sur la période d'étude, seule cette journée a ainsi été invalidée.

Bien que ce ne soit pas dû à un manque de données à l'échelle de la période totale étudiée, le fait de récolter les pluviomètres 1 fois tous les 2 jours par manque de disponibilité du technicien rendent inutilisables ces données à l'échelle journalière. Ainsi 13 jours n'ont pas pu être utilisés pour des comparaisons journalières.

Sur la période d'étude du 07/04/2014 au 14/07/2014, seules 14 journées sur un total de 98 ont été invalidées pour des comparaisons journalières. Pour des comparaisons mensuelles, seule 1 journée a été invalidée. Sur 84 journées étudiées, seuls 4 jours ont été exemptés de toutes précipitations.

III.1.4) Différences de précipitations observées en milieu couvert (au-dessus et en-dessous des arbres)

Pour analyser les données, nous avons comparé les résultats obtenus dans les pluviomètres 1, 2 et 3 correspondant à l'observation du milieu forestier.

III.1.4.1) Etude sur la période totale

Tout d'abord, si l'on observe la quantité d'eau reçue au sein des pluviomètres 1 et 2 pour une même quantité d'eau récoltée dans le pluviomètre 3, on remarque que sur 4 journées types du pluviomètre 3, on observe deux journées consécutives (24/05/2014 et 25/05/2014) présentant exactement les mêmes données pour les pluviomètres 1 et 2, tandis que 2 journées présentent des données différentes pour les pluviomètres 1 et 2. Cela montre l'irrégularité des quantités récoltées au sein des 2 premiers pluviomètres avec ainsi des récoltes plus ou moins importantes dans l'un de ces deux pluviomètres ou dans les deux en même temps (Tableau 3).

Tableau 3 : Représentation de plusieurs journées ayant la même quantité de précipitations : 2,271 l/m² + ou - la marge d'erreur.

	08/05/2014	18/05/2014	24/05/2014	25/05/2014
P1 forêt sous-bois 1 (l/m ²)	2,422	1,590	1,968	2,044
P2 forêt sous-bois 2 (l/m ²)	2,271	1,363	1,514	1,590
P3 cime (l/m ²)	2,271	2,271	2,271	2,347
Marge d'erreur	0,076			

Si l'on s'intéresse à la différence de précipitations obtenues entre les pluviomètres 1 et 2 et le pluviomètre 3, on remarque que, sur 84 jours de mesures, pour le pluviomètre 1, 43 jours présentent des précipitations supérieures au pluviomètre 3, ce qui représente 51% de la période étudiée. Pour le pluviomètre 2, ce sont 33 jours, soient 39% de la période, qui présentent des précipitations supérieures au pluviomètre 3.

De plus, ces changements peuvent être brusques. En effet, on constate que la différence entre chaque pluviomètre (1, 2 et 3) présente des variations positives à négatives en l'espace d'une journée (Tableau 4).

	06/05/2014	07/05/2014	08/05/2014	09/05/2014	10/05/2014
P1 forêt sous-bois 1 (l/m ²)	21,725	3,482	2,422	10,976	25,813
P2 forêt sous-bois 2 (l/m ²)	15,745	5,072	2,271	16,502	37,849
P3 cime (l/m ²)	17,562	4,693	2,271	11,582	24,753
P3-P1	-4,163	1,211	-0,151	0,606	-1,060
P3-P2	1,817	-0,378	0,000	-4,920	-13,096
P1-P2	5,980	-1,590	0,151	-5,526	-12,036
Marge d'erreur	0,076				

Tableau 4 : Evolution des précipitations au cours de 5 jours consecutifs pour les pluviomètres 1, 2 et 3

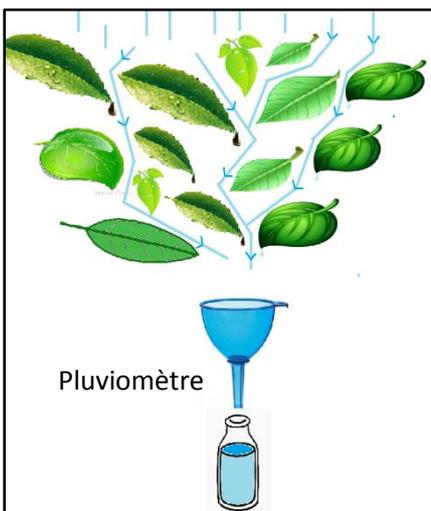
Enfin, si l'on regarde la moyenne journalière des pluviomètres 1 et 2 comparée au pluviomètre 3 sur la période d'étude du 07/04/2014 au 14/07/2014, on constate que, dans notre cas, sous couvert forestier, on récolte plus d'eau qu'au-dessus du couvert forestier (Tableau 5).

moyenne journalière des précipitations du 07/04/2014 au 14/07/2014	
Pluviomètre 1 (l/m ²)	11,112
Pluviomètre 2 (l/m ²)	11,591
Pluviomètre 3 (l/m ²)	10,380
marge d'erreur (l/m ²)	0,076

Tableau 5 : Représentation de la moyenne journalière des précipitations perçues pour les pluviomètres 1,2 et 3 sur une période totale de 97 jours

La faible distance entre chacun des 3 pluviomètres et leur appartenance au même milieu arbustif indique que la différence observée entre le milieu sous couvert et au-dessus du couvert forestier ne provienne pas d'une différence de retombée de précipitations, mais d'une différence au sein du couvert végétal.

Cependant, cette différence au sein du milieu arbustif ne semble pas s'expliquer par le nombre de strates arbustives situées au-dessus des pluviomètres. En effet, la grande variabilité des chiffres pour la différence entre le pluviomètre 1 et 2 montre que ce n'est pas le facteur déterminant dans notre cas quant à la récolte des précipitations (Tableau 4).



Nous avons supposé, dans la partie méthodologie, que la seule différence de précipitations entre les pluviomètres sous couvert arbustif et le pluviomètre au-dessus du couvert arbustif doit s'expliquer uniquement par le phénomène d'évaporation ou encore par l'écoulement le long des troncs des précipitations. Aussi, des chiffres supérieurs à ceux que l'on trouve dans le pluviomètre au-dessus du couvert arbustif semblent improbables.

Une explication possible serait que, dans certaines conditions, et notamment quand le couvert forestier est dense et composé de feuilles larges, celui-ci peut se comporter comme un gigantesque entonnoir : en effet, la surface des feuilles au-dessus du pluviomètre présente une surface plus étendue que la surface de l'entonnoir du pluviomètre ; par conséquent, selon l'orientation de ces feuilles, une surface plus grande que celle de l'entonnoir du pluviomètre peut y être drainée (Figure 5). Ainsi, lors de précipitations, il s'opère une nouvelle répartition spatiale de la pluie résultant de l'égouttement à travers les feuilles et les branches de la végétation.

Figure 5 : Représentation de l'effet « d'entonnoir » au sein du couvert forestier. Réalisé par Sven MAURI

A cela, il faut ajouter le phénomène d'écoulement le long des troncs au-dessus du pluviomètre, comme le font remarquer, RAPP M. et IBRAHIM M. en 1978. En effet, lorsqu'il pleut, les gouttes sont déviées par la végétation. Elles s'écoulent alors le long des troncs jusqu'au sol sans passer par le pluviomètre. La conséquence est que les chiffres au sol sont inférieurs à ceux que l'on récolte au-dessus du couvert forestier. En 1970 (a), AUSSÉNAC G. (p. 384) proposait une méthodologie pour mesurer, sur le terrain, l'eau qui s'écoule le long des troncs, par la mise en place de colliers en matière plastique ceinturant le tronc et capables de récolter les écoulements dans des récipients adaptés. Le

matériel faisant défaut pour appliquer cette méthode, nous avons choisi de nous référer aux chiffres donnés dans la littérature scientifique pour parvenir à une estimation. Nous savons notamment (ULRICH E. et al, 1995, p. 36) que, dans les forêts tempérées, la part de ruissellement le long des troncs peut entraîner une variation de presque 0 à plus de 30 % de la pluviosité en forêt. Ce ruissellement le long des troncs varie selon l'essence et l'architecture :

- branches dirigées vers le haut ou à l'horizontale,
- la morphologie de l'écorce (lisse ou irrégulière) (ULRICH E. et al. 1995 p. 36),
- le diamètre de l'arbre : plus il est grand et plus la quantité d'eau écoulée est importante (AUSSENAC G., 1970a).

Cependant, il arrive d'observer des ruptures de pente au sein des branches, ce qui entraîne la chute de l'eau à l'endroit de cette rupture. Si, à l'endroit de cette rupture, se situe un pluviomètre, alors on récoltera plus d'eau que ce que l'on observe en réalité au-dessus du couvert forestier : notre cas s'apparente à cette configuration.

En règle générale, une partie importante des précipitations est interceptée par le couvert végétal (AUSSENAC G., 1970a, p. 383 ; DEROUICHE A. et al., 1995). Cette perte d'eau pour le sol est provoquée par l'évaporation au sein du couvert forestier (« <http://www.fao.org/docrep/t0178f/t0178f03.htm#2.1%20Les%20arbres%20et%20le%20microclimat> » consulté le 13/03/2014). De ce fait, on doit trouver, pour les pluviomètres 1 et 2, des résultats inférieurs ou égaux à ceux que l'on trouve au-dessus du couvert arbustif. Comme les résultats le montrent (Tableau 5), ce cadre n'est pas le nôtre, et l'on trouve des résultats supérieurs sous couvert arbustif à ceux obtenus au-dessus du couvert arbustif. Cette observation nous conduit à conclure que les pluviomètres n'ont pas été placés de manière à ce qu'ils représentent parfaitement le couvert forestier. Puisque l'écoulement dépend de la forme de l'arbre (« <http://www.fao.org/docrep/t0178f/t0178f03.htm#2.1%20Les%20arbres%20et%20le%20microclimat> » consulté le 13/03/2014), on observe au sol une redistribution très variable des précipitations sous couvert arbustif (AUSSENAC G., 1970a, p. 383 ; ULRICH E. et al., 1995, p. 35). Ce fait a pu être confirmé par l'installation de nos deux pluviomètres 1 et 2 ; cependant, il sera important dans le futur de soit les déplacer, soit rajouter des pluviomètres sous le couvert afin d'avoir des données plus représentatives de la réalité. Ainsi, la méthodologie présentée dans le rapport de AUSSENAC G., en 1970, (p. 384) est différente de la nôtre : le nombre de pluviomètres y est plus important. Ceux-ci n'ont pas été placés selon le nombre de strates qui caractérisent le couvert forestier, mais aléatoirement, avec l'emploi de pluviomètres :

- soit fixes,
- soit mobiles, déplacés périodiquement de manière aléatoire.

Un nombre plus important de pluviomètres serait donc nécessaire pour remplir les conditions de cette méthodologie.

III.1.4.2) Etude pour les journées de faible pluviométrie

Tableau 6 :

moyenne journalière des précipitations inférieure à 1L/m ²	
moyenne P1	0,1834
moyenne P2	0,2131
moyenne P3	0,2772
marge d'erreur	+ou- 0,0076

D'autres tendances apparaissent lorsqu'on prend en compte uniquement les journées ayant reçu moins de 1 l/m² par jour (Tableau 6 et Annexe 3). Sur 13 journées, on obtient, contrairement aux données totales de pluviométrie, des moyennes journalières pour le pluviomètre 1 et 2 inférieures à la moyenne journalière du pluviomètre 3. Ici, il ne semble pas que le phénomène d'entonnoir provoqué par le couvert végétal et le phénomène de rupture de pente des branches au-dessus des pluviomètres sous couvert forestier semble agir. Cela peut s'expliquer par le fait qu'en cas de faible précipitation, les faibles quantités d'eau arrivant au-dessus du couvert forestier ne permettent pas de s'écouler le long des troncs et, au contraire, vont se stocker dans les strates arbustives. Plus la quantité d'eau par événement pluvieux est importante, plus l'arbre est humecté, ce qui favorise l'écoulement le long du tronc (ULRICH E. et al., 1995). Ainsi SZABO M., en 1975, a montré que le ruissellement le long des troncs dans un peuplement de chênes sessiles en Hongrie ne commençait qu'à partir de 5,5 mm.

Ce stockage au sein du couvert devient perceptible par les chiffres récoltés sous couvert forestier, inférieurs aux chiffres récoltés au-dessus du couvert forestier. On peut aussi également avancer que le phénomène d'évaporation au sein du stock du couvert forestier puisse aussi entrer en jeu. Cependant, en période de fortes pluies, le nombre de strates au sein du couvert arbustif ne semble toujours pas jouer un rôle majeur. En effet, le pluviomètre 2, pourtant composé de trois strates, reçoit toujours plus d'eau que le pluviomètre 3 qui possède deux strates. Or on s'attendrait à ce que, plus il y a de strates, plus la capacité de stockage du couvert forestier soit importante, ce qui ne semble donc pas être le cas ici. Un autre facteur peut rentrer ainsi en jeu dans la capacité de stockage du couvert forestier : la taille, le nombre et la forme des feuilles. Ce facteur peut expliquer cette différence constatée entre les pluviomètres 1 et 2.

III.1.4.3) Cas des journées de pluviométrie « normale » précédant des journées de précipitations faibles

En étudiant ces journées, on peut voir que la moyenne du pluviomètre 1 reste inférieure à celle du pluviomètre 3 (Annexe 4). Cela montre que, pendant la « période sèche », le couvert végétal a perdu son stockage d'eau par évaporation. Ainsi, lors de la prochaine pluie, l'interception des précipitations par le couvert végétal est maximale ce qui permet de remplir à nouveau le stockage du couvert végétal. Une fois ce stockage complet, l'eau traverse le couvert jusqu'à, soit s'écouler le long des troncs, soit atteindre le sol et par conséquent le pluviomètre. Cependant, comme on a vu, ce cas ne semble pas être la règle car il y a peu de « périodes sèches » empêchant donc le réservoir du couvert forestier de se vider. Aussi, en période normale de forte pluie, il n'est pas possible de constater « l'influence » du réservoir du couvert végétal car celui-ci étant toujours rempli, l'eau s'écoule directement au sol ou le long des troncs.

Pour le pluviomètre 2 cependant, l'eau récoltée y reste supérieure au pluviomètre 3 (Annexe 4). On peut penser, dans ce cas, que le stock du couvert végétal au-dessus du pluviomètre 2 est plus petit que pour le pluviomètre 1 et que l'influence des effets de « rupture de pente des branches » et d'« entonnoirs » y est plus importante.

Il est alors capital de noter que la capacité de saturation maximale en eau du couvert végétal interceptée par événement pluvieux peut varier selon l'essence, l'humidité initiale du feuillage, la durée de l'événement et la quantité (HOPPE E., 1896 ; AUSSENAC G., 1968 ; CEPPEL N., 1967 cité par ULRICH E. et al., 1995). Cela pourrait expliquer la différence observée entre les pluviomètres 1 et 2.



Photo 10 : Brouillard en milieu forestier au sein du parc autour de 7h

N'ayant pas obtenu de résultats fiables au sol sous couvert forestier, on ne pourra pas vérifier si l'on récolte plus d'eau sous le couvert forestier comparé à ce que l'on récolte en milieu prairial. Ces données pourraient permettre d'expliquer en partie les éventuels résultats d'une augmentation de débit au cours du temps dans la partie reforestée. ULRICH E. et al. écrivent qu'en général, à l'exception des sites soumis à des brouillards fréquents, la quantité d'eau atteignant le sol forestier est inférieure à la quantité d'eau reçue en plein champ. Le Parc étant soumis à des brouillards en fin de nuit et début de matinée, il peut rentrer dans ce cadre (Photo 10). ULRICH E. et al. ajoutent que, selon les différents facteurs influençant la pluviométrie sous couvert forestier, on peut obtenir des résultats variant entre 50% et 90% par rapport à ce que l'on observe en plein champ.

Au final les paramètres dictant les résultats obtenus au sein des pluviomètres sous le couvert arbustif sont :

- l'intensité et la direction du vent,
- l'intensité et la durée de la pluie,
- le couvert arbustif,
- la distribution spatiale des arbres,
- la taille des feuilles et sa densité,
- l'âge du peuplement (ULRICH E. et al. 1995, p. 33),
- la présence de branche avec ruptures de pentes

Pour l'évaporation au sein du couvert végétal, les paramètres rentrant en compte seront également la densité du couvert arbustif et sa capacité à « stocker » l'eau, ainsi que la présence de temps ensoleillé, la température et le degré d'humidité. On peut conclure qu'il existe bien une différence de comportement de l'écoulement au sein du couvert forestier entre des précipitations faibles où le stock d'eau au sein du couvert forestier et l'évaporation se déroule, et des précipitations fortes où des phénomènes de « rupture de pente de branche » et « d'entonnoir » semblent prendre le dessus.

III.1.5) Différence entre le milieu couvert (au-dessus des arbres) et le milieu ouvert

III.1.5.1) Résultats/Interprétations

Tout d'abord, on peut voir que, sur 84 journées étudiées on obtient 47 journées où il pleut plus en milieu arboricole qu'en milieu prairial. Cela signifie que sur la période étudiée, il a plus plu en milieu arboricole, soit 56 % du temps. Avec la prise en compte de la marge d'erreur, 8 % de la période étudiée présentait des précipitations similaires entre les pluviomètres 3 et 4. Enfin, sur les 36 % du temps restant, il a plus plu en milieu prairial. En outre, si l'on regarde la moyenne journalière de précipitations obtenue sur la période totale, on remarque que le pluviomètre 3 récolte le plus de précipitations (Tableau 7) avec 1,3 % de précipitations supplémentaires chaque jour, comparé au pluviomètre 4.

Tableau 7 :

moyenne journalière des précipitations du 07/04/2014 au 14/07/2014		moyenne journalière des précipitations pour les journées recevant moins de 1L/m ²	
Pluviomètre 3 (l/m ²)	10,380	Pluviomètre 3 (l/m ²)	0,2817
Pluviomètre 4 (l/m ²)	10,243	Pluviomètre 4 (l/m ²)	0,1871
marge d'erreur (l/m ²)	0,076	marge d'erreur (l/m ²)	0,0076

Tableau 8 :

Par conséquent sur la période totale étudiée (98 jours) on n'obtient donc pas une différence de pluviométrie de 6 % en faveur de la zone reforestée, comme l'indiquent ESCOURROU G. en 1981 ou encore LAMBERT R. en 1996 pour un climat tempéré océanique. On observe une augmentation entre 1 et 2 % des valeurs décrites par AUSSENAC G., en 1970 (b), dans « Aperçu du rôle de la forêt sur l'économie de l'eau » (cité par COSANDEY C., 2006, p. 318), valeurs alors valables pour les climats tempérés à une échelle locale. On observe plus de précipitations en milieu arboricole qu'en milieu prairial. Le projet de reforestation n'ayant débuté que 7 ans auparavant, on peut penser qu'avec l'évolution et la croissance des arbres dans les prochaines années, la différence de 1,3 % obtenue entre le milieu arboricole et prairial pourra s'accroître et pourra s'approcher des 6 % évoqués par ESCOURROU G.

Il convient encore de prendre en compte l'intensité des précipitations : ESCOURROU G. fait remarquer que cette différence de précipitation entre les deux milieux a tendance à augmenter pendant les années les plus sèches, en faveur de la partie reforestée. Ainsi, en période de faibles précipitations (Tableau 8), sur un total de 13 jours, on constate au sein du Parc une différence de 33,6 % en faveur de la zone reforestée, c'est-à-dire bien supérieure aux 6 % présentés par ESCOURROU G. Par conséquent, on observe bien, en période de faibles pluies un écart de précipitations plus élevé que la normale entre la partie reforestée et prairiale en faveur de la zone reforestée.

Afin de mieux pouvoir interpréter les résultats, il est nécessaire de continuer la prise de résultats tout au long de l'année. Bien que la saisonnalité en Equateur soit moins marquée qu'en Europe, il existe des saisons pluviale et sèche dans cette régions ce qui pourrait avoir des conséquences sur les résultats obtenus.

De plus la zone reforestée n'ayant que 7 ans, la forêt n'a pas atteint son stade adulte et il est encore difficile de définir l'impact total que peut avoir une forêt avec les résultats récoltés.

Comme l'écrit ULRICH E. et al., en 1995, (p. 35) les caractéristiques locales de la pluviosité mensuelle et annuelle pouvant changer considérablement d'une année sur l'autre, il est nécessaire d'effectuer les mesures sur au moins 30 ans pour disposer d'une bonne représentativité de la région. Cependant, il existe également un risque de changement du climat au bout de 30 ans en raison de la possible augmentation de l'effet de serre et qu'il sera nécessaire de prendre en compte (IRWIN J.G. et al., 1990, cité par ULRICH E. et al., 1995, p. 35). Ainsi lors de la poursuite de cette étude sur le long terme, la comparaison des résultats obtenus au sein du Parc avec d'autres pluviomètres situés à l'échelle régionale et nationale devra être effectuée. Cela permettra de vérifier si les différences observées au sein du Parc ne sont pas uniquement des différences observées à l'échelle régionale et nationale et causées alors par un changement global du climat à plus grande échelle.

III.2) La relation reforestation/débit

III.2.1) Limite de la méthode – étude sur un unique bassin versant

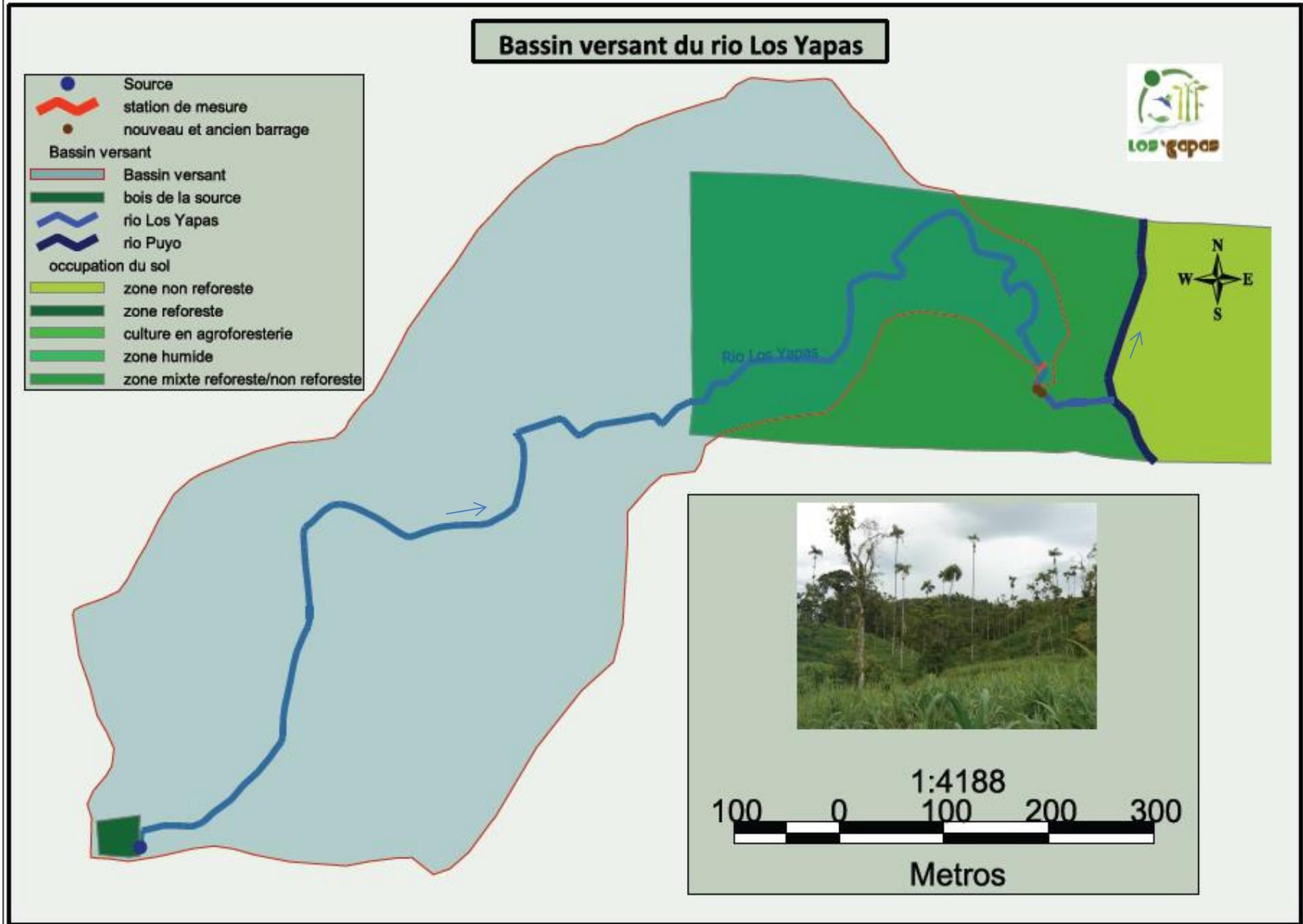
Afin de constater l'influence de la reforestation, l'idéal aurait été d'observer les débits de deux cours d'eau appartenant à deux bassins versants différents. C'est la technique des paires de bassins-versants (KESTENS Y., 2000, p. 7). Ils doivent ainsi présenter :

- une surface identique,
- les mêmes caractéristiques géologiques, pédologiques et climatiques,
- une même exposition au vent, au soleil,
- une pente semblable,
- une forme semblable,
- des débits semblables à l'état initial de l'expérience.

Sur l'un de ces bassins-versant le sol serait recouvert en permanence, et cela tout au long de l'expérience, de la plante invasive présente dans la région : « gramalote ». Ce serait le bassin-versant témoin. Sur l'autre bassin-versant, le sol serait également initialement recouvert de cette plante, puis, à un temps donné, cette plante serait remplacée par un projet de reforestation. De cette manière, il serait alors possible de voir la différence au cours du temps entre le projet de reforestation et le bassin versant modèle n'ayant pas subi de changement. Bien que cette méthode puisse paraître idéale pour l'observation d'un projet de reforestation, Il faut savoir que les écoulements entre bassins versants en forêt primaire varient dans des proportions considérables (FRITSCH J.M., 1992, p. 334). Durant son étude, J.M. FRITSCH a pu voir à l'échelle annuelle une variation des écoulements de 1 à 5 pour des bassins pourtant soumis à une pluviosité quasi uniforme, avec des pentes comparables, des sols dérivés de la même roche mère et une couverture indifférenciée de forêt primaire.

Dans notre cas, il n'a pas été possible d'obtenir deux bassins versant présentant ces caractéristiques. Dans ce cas, comme l'explique KESTENS Y. en 2000 (p. 7), la méthode la plus répandue consiste à « observer sur une longue période l'évolution du rapport entre les précipitations et les débits pour un bassin versant qui a subi une transformation de son couvert végétal ». C'est cette méthode qui a donc été choisi.

III.2.2) Description du bassin versant



III.2.2.1) Récolte des données GPS

La précision des données pour effectuer le bassin versant à l'aide du GPS a varié de 4 m à 60 m (Carte 6). Lors de la réalisation de la carte sur GvSIG, les points extravagants ont été supprimés. Ce sont au total 47 points qui ont été utilisés pour le tracé du contour du Parc, 74 points pour le tracé de la rivière Los Yapas et 73 points pour le tracé du bassin versant.

III.2.2.2) Présentation du bassin versant

Le bassin versant « Los Yapas » se situe sur le cours d'eau Los Yapas. L'exutoire du bassin versant se situe, dans notre cas, au niveau du barrage le long de ce même cours d'eau.

Il est vallonné et composé de nombreuses collines. Sa superficie totale est de 31,99 ha.

L'occupation des sols du bassin versant est constituée pour 25,93 ha de gramalote positionnée en amont du bassin versant, dans la partie extérieure au Parc Los Yapas (Photo 11). Les 5,91 ha sont constitués de la replantation d'arbres dans le cadre du projet de reforestation. Cet espace se situe dans la partie aval du bassin versant (Photo 12).



Photo 11 : Présence de gramalote dans la partie amont du bassin versant



Photo 12 : Partie aval du bassin versant reforestée

La géologie du bassin versant est constituée de deux roches mères principales. L'une est une roche sédimentaire de type poudingue. Ce poudingue provient de dépôts fluviaux caractérisés par la présence de roches aux bords très arrondis et émoussés. Ce poudingue est composé de roches volcaniques provenant de coulées de lave ou encore de fragments d'un autre poudingue, cette fois-ci de type pyroclastique, caractérisé par des roches aux bords beaucoup plus anguleux. On trouve également de la zéolithe qui provient de l'altération de roches volcaniques. La matrice du poudingue fluvial est composée d'argile. Cette roche atteint 3 m d'épaisseur par endroits, selon les affleurements observés (Photo 13). L'autre roche mère correspond à une couche d'argile épaisse d'au moins 1,50 m (Photo 14).

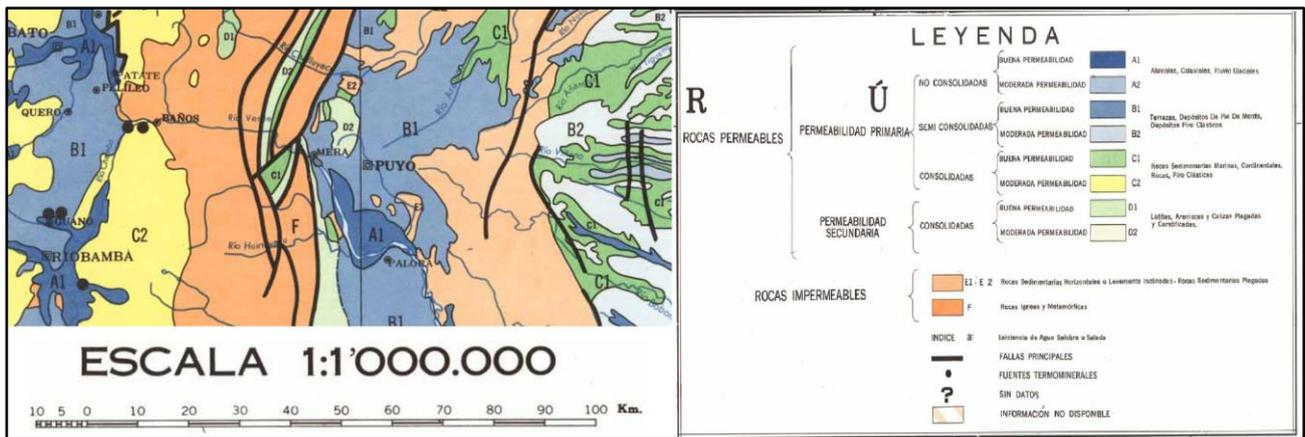


Photo 13 : Affleurement rocheux du poudingue fluvial



Photo 14 : Affleurement argileux (à droite)

Cependant, ces observations ne semblent pas être en accord avec la carte hydrogéologique de l'Equateur de juin 1978 réalisée par l'ORSTOM et le PRONAREG (Carte 7). En effet, sur cette carte, la région de Puyo où se situe le Parc Los Yapas appartient à une roche sédimentaire perméable de piedmont et pyroclastique. Cette différence avec les observations faites sur le terrain peut provenir de l'échelle de la carte qui rend impossible la représentation des dépôts fluviaux causés par le rio Puyo dans la région, notamment au sein du Parc.



Carte 7 : Géologie de la région de Puyo, le parc appartenant à l'ensemble B1 (bleu foncé), une roche perméable primaire semi consolidé de type dépôt de piedmont et pyroclastique

La pente du bassin-versant n'a finalement pas été réalisée, en raison de la forte variation de l'altitude du GPS alors que celui-ci est immobile ; cependant, on peut se référer à la pente du cours d'eau calculée dans la partie suivante.

III.2.3) Description du cours d'eau

Grâce à l'autorisation obtenue des propriétaires voisins, nous avons pu parcourir leur terrain et ainsi atteindre sa source. Cette source s'apparente en réalité à une zone humide juste en aval d'un bois (Photo 16 et Carte 6). Ce bois pourrait bien servir de réserve de stockage pour cette source (Photo 15). Le cours d'eau en lui-même sort quelques dizaines de mètres en contre-bas pendant lesquels il est un cours d'eau sous-terrain (Photo 17).



Photo 15 : Bois en amont de la source

Photo 16 : La source du cours d'eau « Los Yapas ». (Zone humide)

Photo 17 : Partie enterré du cours d'eau

Le cours d'eau, depuis la source jusqu'à l'exutoire (barrage), mesure près de 1500 m. La source se situant à 1069 m d'altitude et son exutoire à 996 m, la pente moyenne du cours d'eau est de 4,87 %. Il reçoit plusieurs affluents. Leur nombre est difficile à évaluer car certains cours d'eau peuvent apparaître en période de crue et non en période sèche ; cependant, ils sont plus de 6 le long du tracé, dont au moins 4 au sein du Parc Los Yapas.

Dans le Parc même, plusieurs drains sont visibles. Il est à noter que, pour l'évaluation de l'influence de la forêt sur les débits du cours d'eau ces drains vont avoir tendance à modifier la réalité, et par exemple, vont vider plus rapidement les stocks d'eau créés par le projet de reforestation. Ces drains avaient été placés au début du projet de reforestation car, au cours de cette période, les sols ont une faible capacité à stocker l'eau et ont tendance à très rapidement se saturer : cela provoque des zones humides importantes où les arbres ont du mal à pousser. Les drains avaient alors pour objectif de rendre les sols un peu moins humides en vue de favoriser la pousse des arbres. Il est toutefois prévu dans le futur, d'ici 5 à 10 ans, le temps que les arbres soit assez grands, de boucher ces drains afin, par la suite, qu'ils n'influencent pas le régime hydrique de la partie reforestée du bassin versant.

III.2.3.1) Hauteur d'eau moyenne au sein de la station de mesure

La hauteur d'eau variant de l'amont à l'aval de la station, afin de caractériser au mieux cette hauteur, nous avons fait la moyenne des hauteurs d'eau observées aux sections transversales amont et aval. Cela permet d'obtenir une hauteur moyenne en faible débit de 60,3 cm sur un total de 10 mesures. Selon MALAVOI J.R. et SOUCHON Y., en 2001, une

hauteur d'eau supérieure à 60 cm on se trouve dans un faciès profond. Cependant il est à noter que la station de mesure est très proche de 60 cm. De plus, elle se trouve sous l'influence de la montée des eaux du barrage et, par conséquent, la station de mesure ne représente pas l'état réel du cours d'eau qui devrait alors se trouver à une hauteur inférieure à 60 cm et correspondre à un faciès peu profond.

III.2.3.2) Vitesse d'écoulement moyenne au sein de la station de mesure

La vitesse d'écoulement observée grâce à la méthode des flotteurs reste supérieure à 30 cm/s pour les 10 mêmes mesures (49 cm/s). Selon MALAVOI J.R. et SOUCHON Y. (2001), nous sommes dans un faciès lotique lorsque la vitesse est supérieure à 30 cm/s.

III.2.3.3) Profil en travers de la station de mesure

Deux profils en travers ont été réalisés dans la station de mesure sur les sections transversales (Graphiques 2 et 3). On remarque alors un caractère symétrique pour la section transversale amont et un caractère asymétrique pour la section transversale aval. Grâce à la Figure 6 et les informations précédentes sur les vitesses d'écoulement (III.2.3.2) et de profondeur (III.2.3.1), la station de mesure peut être classée comme chenal lotique. Cependant, le caractère asymétrique de la section aval permet de penser que la station est également proche d'une mouille de concavité.

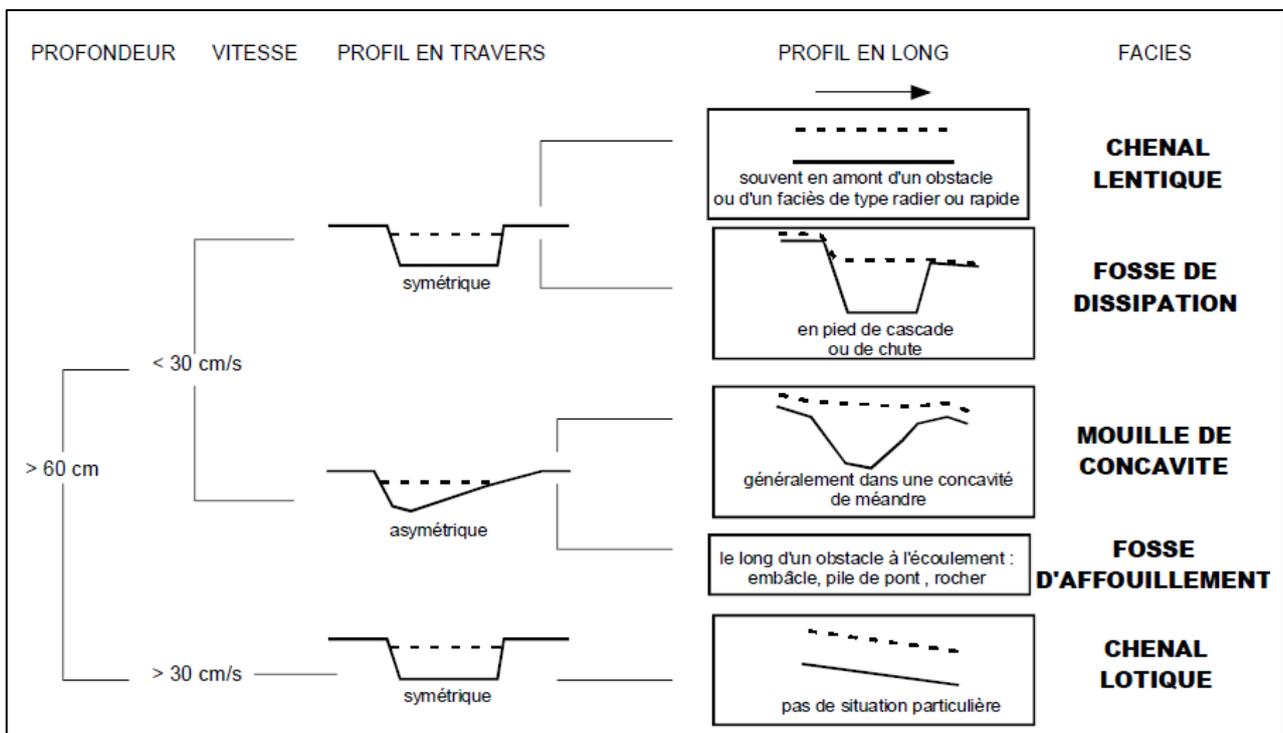


Figure 6 : Clé de détermination des faciès d'écoulement (extrait tiré de MALAVOI J.R. et SOUCHON Y., 2001, Table I, p360)

III.2.3.4) Granulométrie du substrat au sein de la station de la mesure

La méthode visuelle utilisée par MALAVOI J.R. et SOUCHON Y. (1989) qui propose un classement du substrat (Tableau 9) a été employée. On obtient alors des blocs, parmi les éléments les plus grossiers. Ce sont également les éléments dominants de la station. Le second élément dominant est constitué de graviers fins.

Nom de la classe granulométrique	Classes de taille (diamètre en mm perpendiculaire au plus grand axe)	Code utilisé
Rochers	> 1024	R
Blocs	256-1024	B
Pierres Grossières	128-256	PG
Pierres Fines	64-128	PF
Cailloux Grossiers	32-64	CG
Cailloux Fins	16-32	CF
Graviers Grossiers	8-16	GG
Graviers Fins	2-8	GF
Sables Grossiers	0,5-2	SG
Sables Fins	0,0625-0,5	SF
Limons	0,0039-0,0625	L
Argiles	< 0,0039	A

Tableau 9 : Echelle granulométrique de WENTWORTH (1922) modifiée dans MALAVOI J.R. et SOUCHON Y. (1989) tirée de MALAVOI J.R. et SOUCHON Y., 2001, Table II, p. 361.

D'après nos calculs et nos observations sur le terrain, on peut alors décrire le cours d'eau - et plus précisément la station de mesure - comme ayant un faciès profond lotique. Son profil symétrique en amont et asymétrique en aval permet de le classer en chenal lotique ou mouille de concavité, montrant l'arrivée d'un virage en aval. La granulométrie nous renseigne sur le caractère stable ou mobile du fond du lit- ; les blocs, majoritaires, sont stables, mais la présence de graviers fins nous font penser que ceux-ci peuvent se déplacer facilement jusqu'à créer des « bancs mobiles ». Ce caractère mobile est un élément important à prendre en compte et qu'il est nécessaire de surveiller, notamment pour la modification des sections transversales.

III.2.4) Mesure des débits

III.2.4.1) Choix du nombre de chiffres significatifs pour la mesure des débits.

Comme l'indique ALDEGHERI M. dans le tome IV du manuel d'Hydrométrie, il est préférable d'utiliser les l/s face au m³/s en cas de faible débit. Le cours d'eau étudié ne dépassant pas 1 m³/s durant notre période d'étude, et cela quelle que soit la méthode de mesure de débit utilisées, (valeur maximale observée : 202,45 l/s le 02 juin ; valeur minimale observée : 2,56 l/s le 26 juin), nous avons choisi de convertir chaque mesure de débit en l/s.

Ce même manuel déclare que, face à la précision que l'on peut atteindre dans les conditions normales de mesure sur le terrain, l'utilisation de 3 chiffres significatifs est suffisante, quelle que soit la valeur du débit. Par conséquent, notre choix s'est également porté sur une présentation des résultats des débits à 3 chiffres significatifs.

III.2.4.2) Résultat des mesures de débit par méthode volumétrique (Annexe 5)

III.2.4.2.a) Source d'erreur et limite de la méthode

Plusieurs sources d'erreurs sont possibles et certaines vont varier selon l'importance du débit.

Une première source d'erreur peut être imputée à l'ouvrage.

La source d'erreur principale consiste en l'apparition de fuites au sein de l'ouvrage, c'est-à-dire que des sorties d'eau peuvent être visibles, qui se font hors des tubes servant à mesurer le débit. Cela démontre que l'ouvrage n'est pas totalement étanche et que chaque mesure de débit calculée est en réalité inférieure au débit réel.

Ces fuites apparaissent surtout quand le débit est fort. Bien que plusieurs tentatives aient été effectuées afin de les stopper en essayant de colmater, il n'a pas été possible de les faire disparaître complètement. Ces fuites sont donc un élément à prendre en compte dans les résultats.

On peut observer ce phénomène de perte lorsque l'on mesure le débit des deux manières suivantes :

- La première consiste à mesurer le débit d'un tube alors que le deuxième est bouché.
- La seconde consiste à mesurer le débit de ce même tube avec le deuxième non bouché.

Lorsque l'on bouche un tube, on doit s'attendre, s'il n'y a pas de fuite, à recevoir dans l'autre tube le débit du tube bouché selon la capacité maximale des tubes.

Ainsi, le 26/05/2014 on observe que, pendant cette expérience (Tableau 10 et Photo 19), les débits restent égaux, que les tubes soient bouchés ou non, alors que le débit maximal observé par tube est de 12,26 l/s. Cela signifie que le débit n'a

pas augmenté dans le tube non bouché et que l'eau provenant du tube bouché s'est infiltrée dans des interstices du barrage.

	26/05/2014			
	tube numero 1	tube numero 2	tube bouché 1	tube bouché 2
essai 1	5,403	5,232	4,944	5,354
essai 2	5,201	5,253	5,096	5,632
essai 3	5,668	5,111	5,579	5,579
moyenne	5,424	5,199	5,206	5,522
écart-type	0,191	0,063	0,271	0,121
moyenne totale	5,311		5,364	

Tableau 10 : Mesure de débit par méthode volumétrique en l/s. Comparaison des résultats obtenus en bouchant ou non l'un des tubes

Tableau 11 : Mesure du débit total (l/s) par addition des moyennes de chaque tube

	26/05/2014	
	tube numero 1	tube numero 2
moyenne des essais	5,424	5,199
écart-type	0,191	0,063
débit total (addition tube)	10,623	

Un autre phénomène a permis de mettre en évidence ces fuites. Le 24/06/2014, le niveau d'eau atteint à la section transversale amont est de 22 cm soit le plus bas enregistré durant notre période d'étude. Ce niveau ne permet pas à l'eau d'atteindre les deux tubes du barrage qui sont situés à une hauteur supérieure. Malgré que l'eau ne s'écoule pas par les tubes du barrage on remarque que l'eau s'infiltré et ressort dans la partie inférieure de l'ouvrage.

De plus, les mesures de débit par méthode volumétrique sont rendues impossibles dès lors que l'eau déborde du barrage (Photo18). Dans ce cas, cela signifie que le volume maximum pouvant passer par les tubes est atteint et, par conséquent, la méthode volumétrique n'est plus opérationnelle pour effectuer des mesures de débit, causées par de trop fortes pertes. Durant ces périodes, seules les mesures par la méthode incomplète des flotteurs seront alors prises en compte.

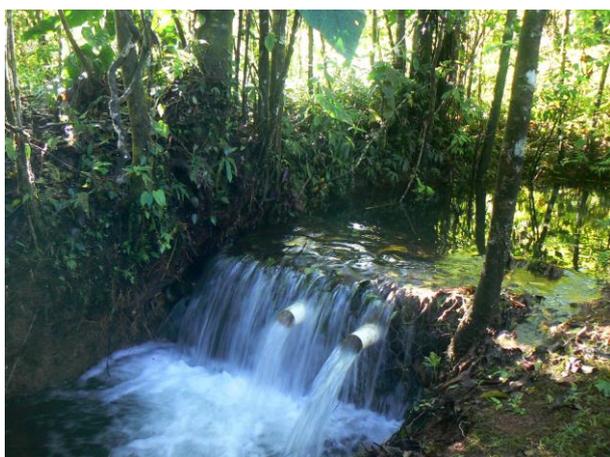


Photo 18 : Débordement du barrage le 02/06/2014 (hauteur d'eau à la section transversale amont = 67 cm)



Photo 19 : Période de basses eaux le 26/06/2014 (hauteur d'eau à la section transversale amont = 33 cm)

Afin de quantifier les pertes causées par ces fuites, la comparaison des mesures de débit par méthode volumétrique et la méthode incomplète par flotteur a été réalisée.

Son estimation sera abordée plus loin dans ce rapport, lors de la comparaison des résultats de la courbe de tarage obtenus avec ces deux méthodes.

Une fois que le problème des fuites du barrage sera résolu, ainsi que le fait remarquer, en 1970, RODIER J.A., comme pour les crues et les périodes d'étiages, il est important de réaliser des campagnes de mesures régulières tous les ans (et notamment de basses eaux), ce qui permet d'éviter des erreurs allant jusqu'à 1 000 % (mille) lors de la réalisation de la courbe de tarage.

III.2.4.2.b) Choix de la méthode de prise de mesures

La méthodologie d'Anna LI-MARCHETTI consistait à boucher les tubes l'un après l'autre, tout en effectuant 6 mesures pour chacun des tubes. Comme il a été dit lors de la reconstruction de l'ouvrage, des fuites étaient visibles et perceptibles dans les résultats obtenus, l'on bouche ou non les tubes. Afin d'avoir une meilleure représentativité du débit, il a été choisi de ne pas boucher les tubes lors du calcul du débit. Au contraire, nous avons effectué les mesures avec les deux tubes ouverts ; pour chaque tube, ce ne sont pas 6 mais 3 essais qui sont effectués car les résultats sont déjà très similaires avec des écarts-types assez faibles avec 3 essais. Pour connaître le débit total, on additionne la moyenne des débits obtenus pour le tube 1 et le tube 2 (Tableau 11).

III.2.4.3) Comparaison des mesures de débit par méthode volumétrique avec celle effectuée par Anna LI-MARCHETTI

Dans le rapport d'Anna LI-MARCHETTI, 5 mesures de débit effectuées pendant son stage ont été présentées. Son choix avait porté sur des mesures de débit (l/s), hors des périodes de pluies et portant plus sur des périodes sèches :

0,62 / 0,17 / 5,31 / 9,86 / 8,03

Ces mesures sont difficiles à comparer avec celles réalisées durant ma période de stage, pour les raisons suivantes :

Tout d'abord, l'ouvrage de mesure est différent, et par conséquent la marge d'erreur causée par les fuites peut avoir différé. Ensuite, alors que les débits 0,62 et 0,17 l/s correspondent respectivement aux mesures réalisées au 3^{ième} et 4^{ième} jours sans pluie, durant notre période d'étude, ce phénomène ne s'est pas reproduit empêchant toute comparaison.

Ces mesures de débits ne pourront également pas être exploitées dans le cadre de la création d'une courbe de tarage, car aucun relevé du niveau de l'eau limnimétrique n'avait été effectué pendant la mesure de ces débits.

Cependant, la conclusion qu'énonce Anna LI-MARCHETTI sur la forte dépendance entre les débits et la pluviométrie peut être confirmée. En effet, bien que les relevés de précipitations et de débits ne s'effectuent pas aux mêmes horaires et que les mesures de pluviométrie correspondent au total sur une journée (par conséquent il peut pleuvoir les 3 premières heures, puis s'arrêter jusqu'au lendemain), on peut voir, grâce aux observations sur le terrain, que la réponse des débits aux précipitations est très courte (quelques heures), cela pouvant être attribué à des sols saturés en eau une grande partie du temps.

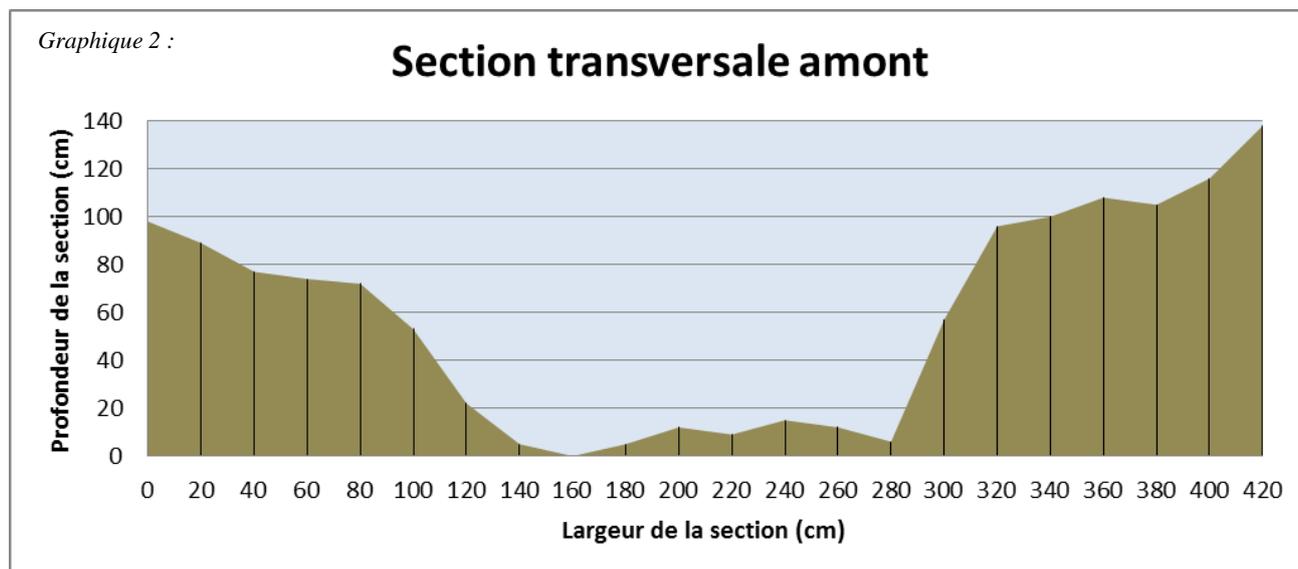
III.2.4.4) Résultat des mesures de débit par méthode incomplète aux flotteurs (Annexe 6)

III.2.4.4.a) Résultats des sections transversales

Deux sections transversales ont été effectuées le long de la station.

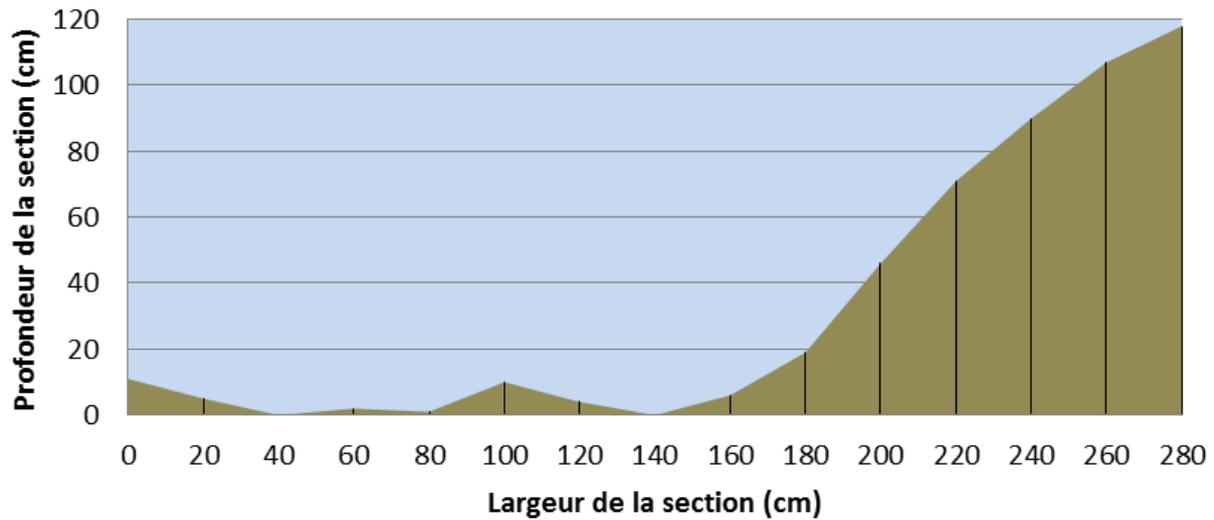
La première section transversale la plus en amont a été réalisée sur 4,20 m de largeur sur une hauteur maximale de 1,38 m (Graphique 2).

La deuxième section transversale la plus en aval a été réalisée sur 2,80 m de largeur sur une hauteur maximale de 1,64 m (Graphique 3).



Graphique 3 :

Section transversale aval



Les profils des deux sections sont assez différents. Le profil de la section aval présente les caractéristiques de berges en début de virage (Figure 5). La berge gauche est abrupte et atteint très rapidement la profondeur maximale du lit. C'est la caractéristique d'une berge pouvant être sujette à l'érosion. La berge droite de la section aval présente au contraire une pente plus faible, significative d'une berge non érodée et pouvant être sujette à des dépôts.

Par conséquent, la partie aval de la station de mesure semble être déjà sous l'influence du virage situé 10 mètres en aval de cette section. Cette partie paraît donc être le plus soumise à des variations de berges. Il serait important de surveiller cette berge et de ré-effectuer une mesure de cette section dans quelques mois afin de vérifier sa stabilité.

De plus, la modification de la forme du lit entre l'amont et l'aval peut avoir des conséquences sur le courant et peut expliquer des différences de vitesse entre la berge gauche, plus profonde et la berge droite, moins profonde. Afin de ré-homogénéiser les berges, il serait donc important de continuer le travail de stabilisation des berges et notamment celle de la rive gauche.

Il est important que la section transversale puisse être capable de mesurer les débits les plus importants. Dans notre cas, malgré la prise en compte de la hauteur des crues précédentes, la hauteur maximale et par conséquent, la largeur des sections, ont été sous-estimées. En effet après une crue importante, les fils servant à délimiter la limite supérieure des sections transversales ont été submergés. Cela a pu être vérifié grâce à la présence de débris végétaux accrochés à ces fils (Photo 20).

Cette sous-estimation de la section transversale s'explique par le fait que la connaissance des crues s'est basée sur celles existantes avant la création du barrage. Or le barrage a causé une surélévation du niveau de l'eau qui permet aux crues d'obtenir une hauteur d'eau plus importante. C'est cette surélévation qui a été sous-estimée dans notre cas.

Malgré cet événement, il n'a pas été souhaité, bien qu'il soit nécessaire de le faire dans le futur, de mesurer de nouveau l'aire des sections. En effet, la traversée impraticable du Rio Puyo pendant ces événements de crue ne nous permet pas d'aller mesurer les débits du Rio Los Yapas pendant ces mêmes périodes, ce qui rend alors inutile la mesure des sections à une altitude supérieure. Il faudra remesurer les aires des sections une fois qu'il sera possible de traverser le Rio Puyo pendant ces fortes crues. De plus, le cours d'eau pouvant présenter des « bancs mobiles », il est important de réaliser de nouveau les mesures d'aire des sections transversales après chaque crue (ROCHE M., 1963, p. 207).

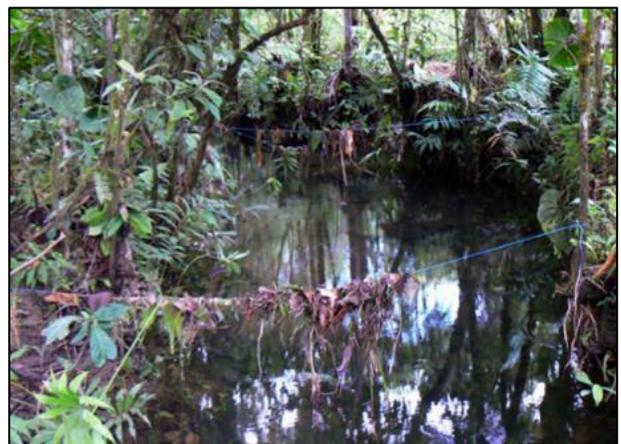
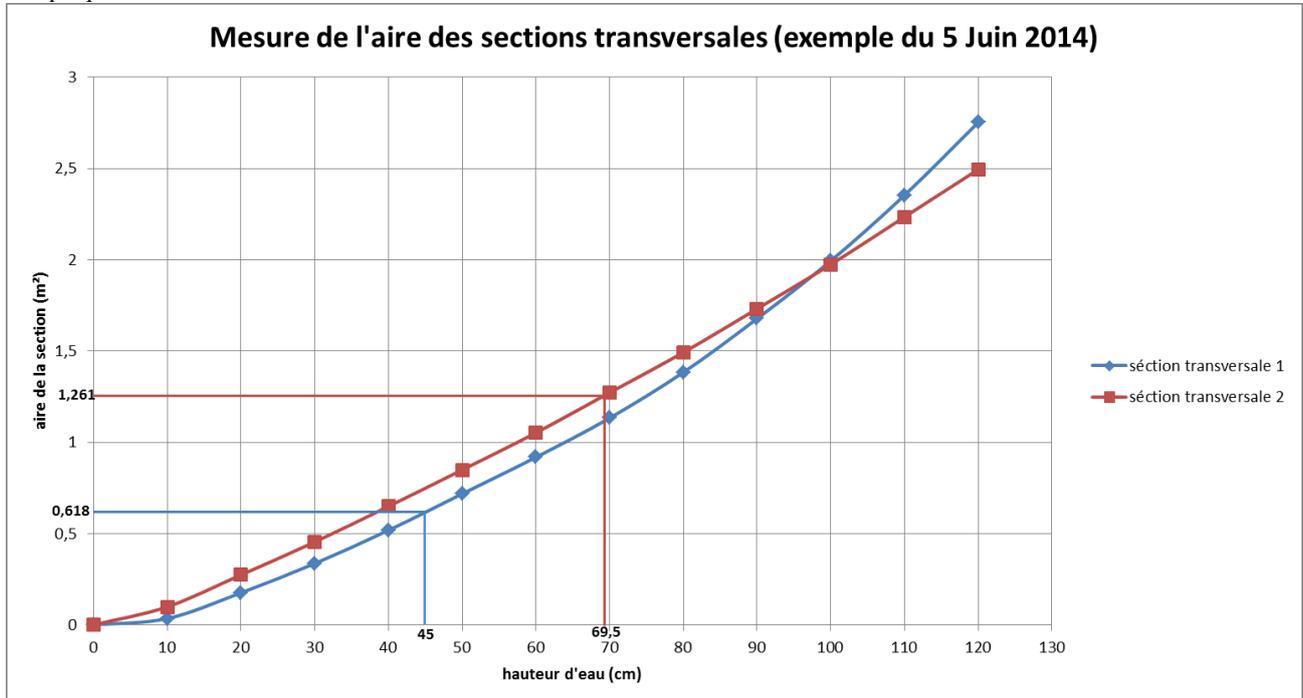


Photo 20 : Etat de la station de mesure le 15/05/2014

III.2.4.4.b) Calcul de l'aire de la section mouillée S_m

Grâce à l'établissement du graphique montrant l'aire de la section transversale en fonction de la hauteur d'eau, il est simple de connaître l'aire de la section mouillée. Ainsi, le 5 juin on note une hauteur de 45cm pour la section 1 et de 69,5 cm pour la section 2 (Graphique 4). Sur le graphique 4, on lit respectivement une aire de 0,618 m² et de 1,261 m². Pour l'aire de la section mouillée finale, on obtient donc la moyenne des deux, soit : 0,939 m².

Graphique 4 :



III.2.4.4.c) Choix du coefficient K pour la mesure de débit avec la méthode incomplète des flotteurs.

N'ayant pas pu effectuer de mesure de vitesses moyennes de surface (V_{ms}) et de vitesse U avec les méthodes complètes de mesure de débit, nous avons cherché les valeurs de K dans la littérature. Cela peut en soit paraître comme une source d'erreur de mesure, du fait que la valeur de K n'est pas la réflexion directe du cours d'eau étudié.

On trouve alors différentes valeurs de K dans la littérature selon l'état du cours d'eau (ROCHE M., 1963, p. 207):

- Vitesses fortes, profondeur supérieure à 4 m : 1,00
- Vitesses moyennes en rivières de montagne : 1,05
- Grands fleuves : 0,95
- Pentes moyennes, rivières moyennes : 0,90 à 0,95
- Faibles pentes, rivières moyennes : 0,85
- Vitesses très faibles : 0,80

Nous avons choisi d'utiliser la valeur de K pour des vitesses très faibles, correspondant mieux à l'état du cours d'eau. Cette valeur de K a alors pour conséquence d'abaisser la valeur du débit.

III.2.4.4.d) Résultats des vitesses obtenues par flotteurs

III.2.4.4.d.i) Source d'erreur

La principale source d'erreur provient de l'estimation de la longueur parcourue par le flotteur, nous avons accordé une valeur moyenne de la longueur à 4m pour chaque mesure de débit. Or en réalité la longueur parcourue par le flotteur va varier causé par la forme de la station. Ainsi bien que le tracé soit rectiligne, le virage en aval et la forme des sections transversale entraine des modifications de courants au sein de la station. Cela va alors pouvoir se traduire par un trajet du flotteur non rectiligne ou non perpendiculaire aux sections de mesure et par conséquent des longueurs différentes de son trajet.

Afin de régler au mieux ce problème, ALDEGHERI M. dans le tome IV du Manuel d'Hydrométrie, détaille des méthodes utilisant des chronomètres à aiguilles rattrapantes c'est-à-dire un chronomètre muni de deux aiguilles pouvant partir simultanément mais pouvant être arrêtées séparément. L'une de ces méthodes utilise un seul chronomètre et la

seconde, plus précise, utilise deux chronomètres. Cette dernière méthode est détaillée en Annexe 1. Elle nécessite 2 à 3 techniciens, ce qui, dans notre cas, n'était pas réalisable car seul un technicien était disponible pour effectuer chacune des mesures. Cette méthode permet de mesurer les distances FF' et GG' à partir des temps mesurés au point F et au point G (Figure 7). Une fois GG' et FF' mesurés on est en capacité de savoir si le flotteur a bien suivi un parcours parallèle aux rives ou non. On a ainsi :

$$GG' = \frac{t_a}{T_a} \times CD$$

$$FF' = \frac{T_c - t_c}{T_c} \times AB$$

t_a étant le temps pour parcourir la distance l_a

t_c étant le temps pour parcourir la distance l_c

T_a étant le temps retenu par l'opérateur en A pour parcourir la distance L (voir Annexe 1)

T_c étant le temps retenu par l'opérateur en C pour parcourir la distance L (voir Annexe 1)

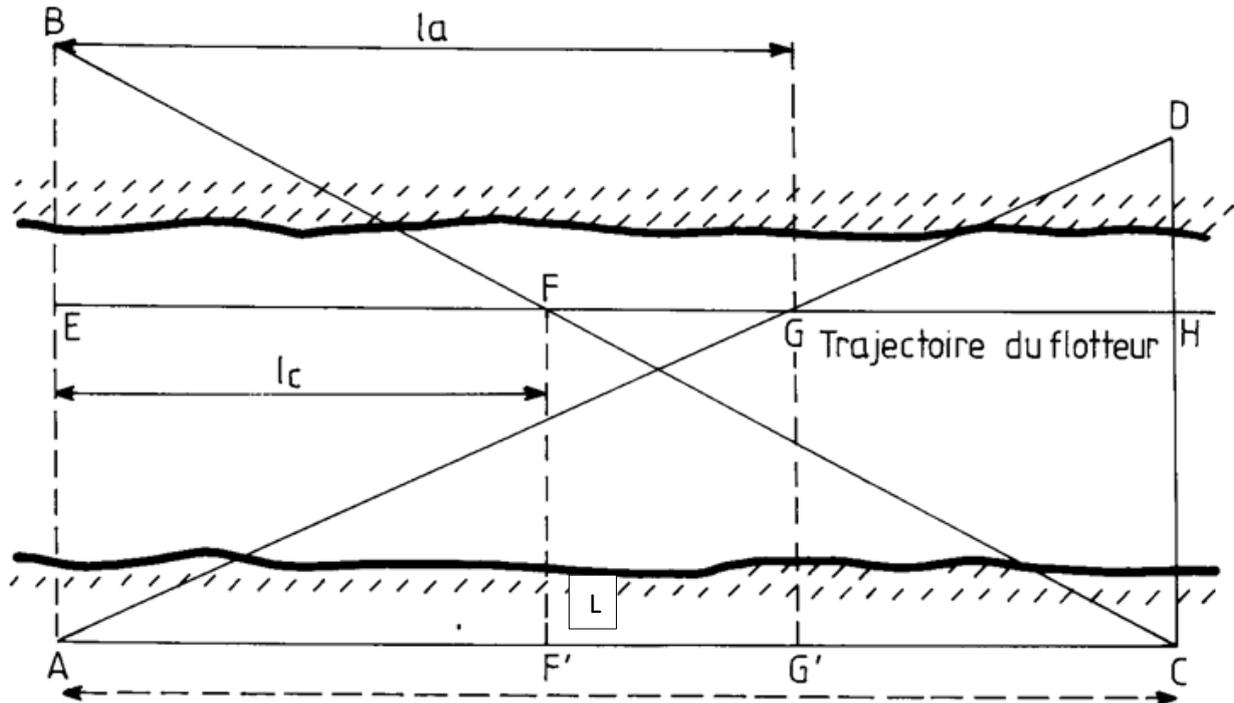


Figure 7 : Calcul des vitesses et positions des flotteurs (tiré de G. JACCON)

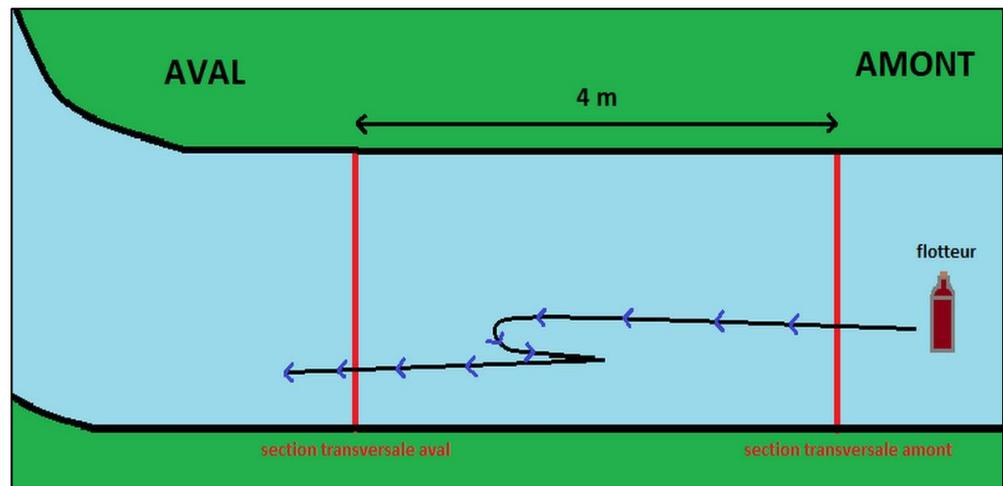
Cependant cette méthode présentée par ALDEGHERI M. ne peut s'appliquer que lorsque le flotteur se déplace directement de la section AB à la section CD. Or dans notre cas, des contre-courants en période de basses eaux ont été observés, c'est-à-dire que le flotteur, au lieu d'aller d'amont en aval pouvait se déplacer d'aval en amont au sein de la station de mesure. Ces phénomènes dans le calcul de vitesse ont été pris en compte car ils représentent une réalité de la vitesse du courant. La prise en compte de ces événements s'est réalisée de la manière suivante :

La distance parcourue par le flotteur est considérée comme identique pour chaque mesure, soient 4 m et cela, même si le flotteur parcourt plus, et notamment en période de contre-courant. En effet, on a considéré que ces périodes de contre-courant constituaient un ralentissement du courant entre le point amont et aval de la station. Nous n'avons pas considéré cet événement comme une augmentation de la distance parcourue du flotteur (Figure 8), car ces contre-courants peuvent être la conséquence de l'influence d'un virage 7 m en aval de la station de mesure (Carte 5).

Ces irrégularités en période de basses eaux est un phénomène confirmé par J.A. RODER car il fait état de la forte irrégularité spatiale dans la station de mesure en cas de vitesse très faible.

Un adoucissement de la courbe en aval pourrait permettre de réduire la présence de ces contre courants.

Figure 8 : Exemple de trajet non rectiligne d'un flotteur au sein de la station de mesure (contre-courant)



Le temps qu'un flotteur met pour parcourir la station varie beaucoup selon que la bouteille a été posée près de berges ou au milieu du cours d'eau. Ainsi, pour l'exemple du 15 juin, on peut voir que l'écart type pour les essais 1 et 2 des mesures de temps est important : il est causé par des variations de débit au sein du cours d'eau (Tableau 12). On peut notamment voir que les flotteurs vont moins vite pour parcourir la station lorsqu'ils sont proches des berges.

15-juin				
	essai 1	essai 2	moyenne	ecart-type
rive droite	54,72	52,03	53,38	1,35
milieu droit	38,91	36,31	37,61	1,30
milieu gauche	32,78	34,53	33,66	0,88
rive gauche	51,53	52,19	51,86	0,33
moyenne	44,49	43,77	44,13	
écart type	8,98	8,37		

Tableau 12 : Mesure du temps (s) que met un flotteur pour traverser la station au cours de deux essais et selon l'emplacement des flotteurs au sein du cours d'eau

III.2.4.4.d.ii) Limite liée à la méthode

La limite de cette méthode consiste dans l'impossibilité d'effectuer des mesures de débit lorsque le niveau d'eau est trop bas. En effet en période de très faible débit, le barrage agissant jusqu'à la station de mesure provoque le ralentissement de l'eau jusqu'à sa stagnation ; le flotteur ne se déplace plus et empêche la prise de mesures. De plus, à une hauteur légèrement supérieure le courant reprend, mais les contre-courants présents le long des berges, sont impraticables. Le flotteur va utiliser le courant principal au milieu du lit de la rivière, sans tenir compte des contre-courants, ce qui va effectuer une surestimation du débit observé par rapport au débit réel.

III.2.4.4.d.iii) Limite liée à l'environnement

Comme il a été dit précédemment, il n'est pas possible de mesurer les débits en période de fortes crues, tant que le Rio Puyo n'est pas franchissable pendant ces périodes

III.2.4.4.e) Etablissement de la courbe de tarage

Dans notre cas, ce sont 15 mesures de jaugeage qui ont été mesurées avec la méthode volumétrique, et 15 mesures pour la méthode incomplète des flotteurs, c'est-à-dire plus que ce que préconise M. ALDEGHERI dans le tome IV du Manuel d'Hydrométrie. Parmi ces nombreuses mesures, 8 jaugeages ont été effectués en même temps avec les deux méthodes afin de comparer leurs résultats. Comme expliqué précédemment, la difficulté d'accès au site ne nous a pas permis d'observer certaines crues importantes qui auraient pu nous aider à mieux réaliser la courbe de tarage.

De même, les débits les plus faibles n'ont également pas été relevés en raison du passage de l'eau par les interstices du barrage et non pas par les tubes.

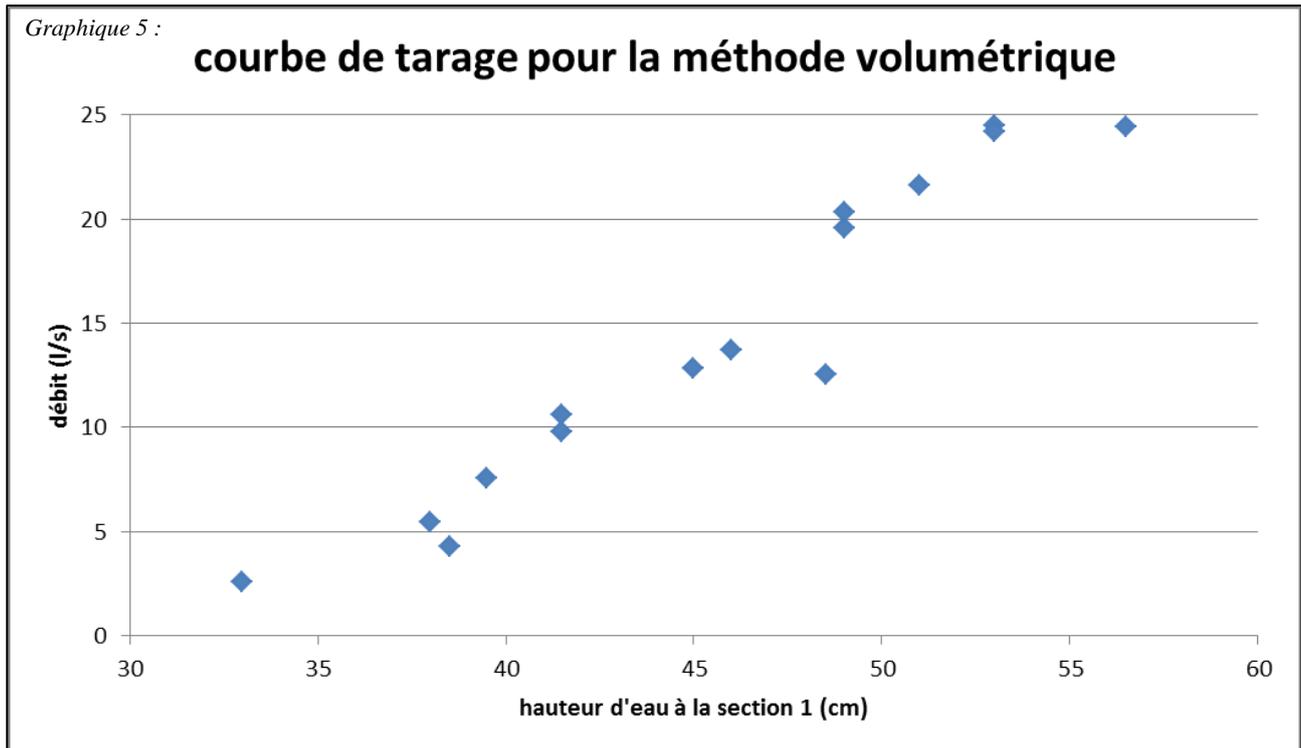
Par conséquent les courbes de tarage obtenues sont incomplètes et devront dans le futur être complétées après avoir réalisé les modifications nécessaires, tels que la création d'un ouvrage pour traverser le rio Puyo en période de forte crue et le colmatage du barrage.

III.2.4.4.e.i) Courbe de tarage avec la méthode volumétrique

C'est avec cette méthode que l'on relève les plus faibles débits ainsi que les plus faibles hauteurs d'eau. Bien que l'on ait peu de données, il semble que le débit maximal (24,5 l/s) est atteint à partir de la hauteur d'eau de 53 cm. Ce phénomène est causé par l'atteinte de la capacité maximale, traversant les tubes à cette hauteur. Ainsi, à 56,5 cm on est certain d'avoir atteint la capacité maximale des tubes car l'eau déborde du barrage à cette hauteur (graphique 5).

Avec 6 mesures partageant des hauteurs d'eau similaires pour des journées différentes, on peut voir que la précision des mesures par méthode volumétrique est forte, avec une variation maximale de 0,4 l/s et restant au-dessus de 90 % (Tableau 13).

Seul le point situé à 48,5 cm semble être un point incorrect en se démarquant de la tendance de la courbe de tarage. Ce point ne sera pas pris en compte dans la courbe de tarage finale, tout comme le point situé à 56,5 cm, dont le débit a atteint la valeur limite des tubes.



	03-juin	04-juin	16-juin	23-juin	26-mai	17-juin
hauteur d'eau (cm)	53		49		41,5	
débit (l/s)	24,5	24,2	19,6	20,3	10,6	9,8
moyenne	24,4		20,0		10,2	
écart type	0,2		0,4		0,4	
précision (%)	98,8		96,5		92,2	

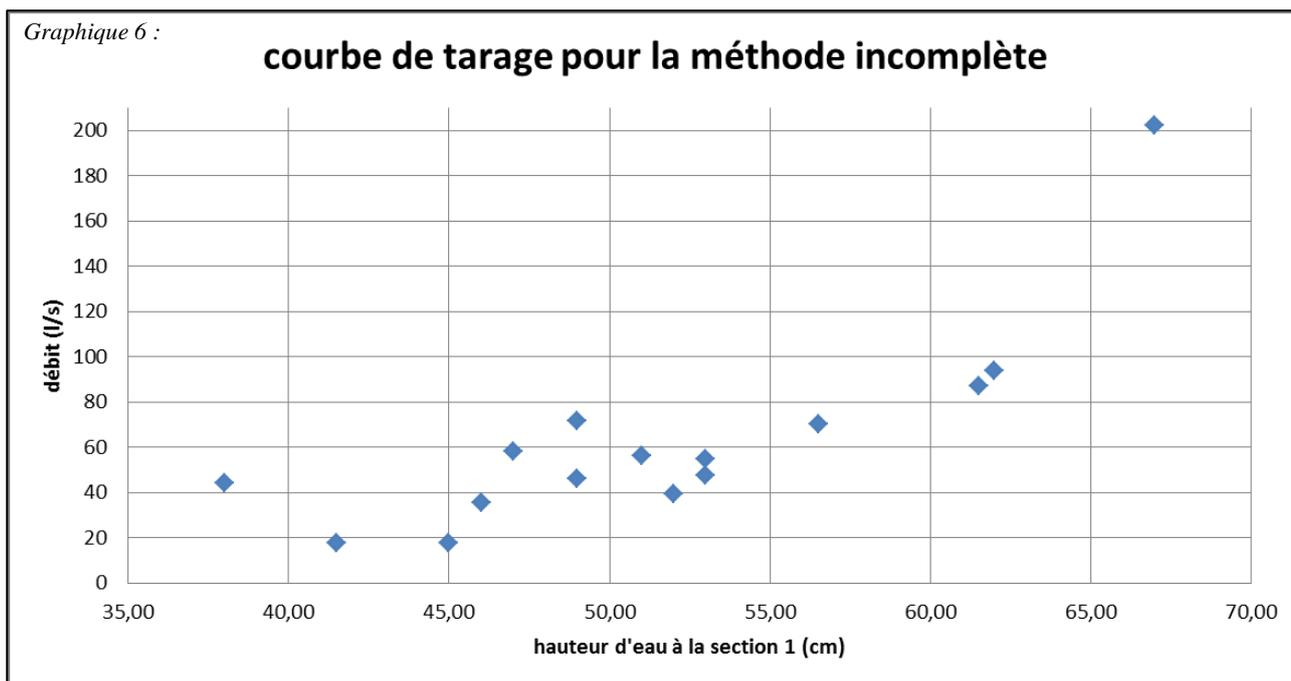
Tableau 13 : Présentation de différentes mesures de débit par méthode volumétrique pour des hauteurs identiques

III.2.4.4.e.ii) Courbe de tarage avec la méthode incomplète des flotteurs

Cette méthode semble plus adaptée pour des mesures de débits plus élevés que la méthode volumétrique. En effet il est possible de mesurer des débits dépassant la capacité maximale des tubes de la méthode volumétrique (graphique 6). Ainsi, des mesures de débits ont été effectuées pour des hauteurs supérieures à 53 cm. Bien que des mesures aient été prises à partir de 38 cm, les mesures de débits pour de faibles hauteurs semblent incorrectes ; cela peut provenir de la mauvaise estimation des contre-courants en période de faible courant ainsi que de la stagnation de l'eau. Par conséquent, la mesure prise à 38 cm semble être surestimée et elle n'a pas été prise en compte dans la courbe de tarage finale. De même le point ayant pour débit 71,5 l/s pour une hauteur de 49 cm semble également être surestimé et n'a pas été prise en compte dans la courbe de tarage finale.

Concernant la précision des données, la méthode incomplète est moins précise que la méthode volumétrique. Ainsi, la précision est inférieure à 90 % et est même de 57,2 % pour une hauteur d'eau de 49 cm ; cependant, ce dernier chiffre

est à relativiser, étant donné que la valeur du 23 juin de 71,5 l/s ne sera pas utilisée dans la courbe de tarage finale, comme il a été cité précédemment (Tableau 14).



	03-juin	04-juin	16-juin	23-juin
hauteur d'eau (cm)	53		49	
débit (l/s)	54,8	47,8	46,3	71,5
moyenne	51,3		58,9	
écart type	3,5		12,6	
précision (%)	86,3		57,2	

Tableau 14 : Présentation de différente mesure de débit par méthode incomplète pour des hauteurs identiques

III.2.4.4.e.iii) Courbe de tarage avec la comparaison des deux méthodes volumétrique et incomplète par flotteurs.

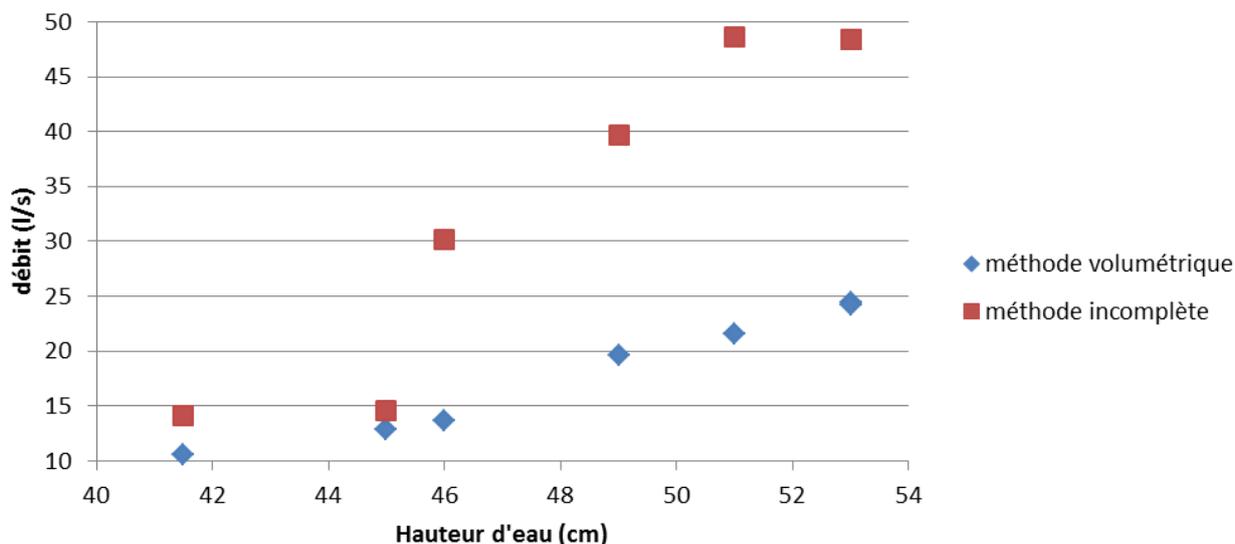
On voit tout d'abord que pour chaque mesure c'est la méthode incomplète qui présente les débits les plus élevés (Graphique 7). Cela peut être causé :

- d'une part par la sous-estimation du débit réel par la méthode volumétrique causée par la présence de fuite dans l'ouvrage ;
- mais cela peut aussi être dû à la surestimation des débits de la méthode incomplète, comme il a été expliqué précédemment.

Enfin, on constate que, plus la hauteur d'eau est importante, plus l'écart de résultat entre les deux méthodes est fort (Tableau 15). On peut supposer que les fuites sont plus importantes quand le débit augmente ce qui cause alors un écart plus important. Par conséquent, pour la courbe de tarage final, il a été choisi de ne pas prendre en compte les mesures volumétriques ayant un écart trop important par rapport aux mesures de la méthode incomplète, notamment pour les hauteurs d'eau les plus élevées, là où le risque de fuites au sein de l'ouvrage semble le plus élevé. De ce fait, il a été décidé de ne pas prendre en compte les débits volumétriques dont l'écart était supérieur à 70% par rapport à ceux de la méthode incomplète.

Graphique 7 :

courbe de tarage avec comparaison des deux méthodes volumétrique et incomplète



hauteur (cm)	41,5	45,0	46,0	49,0	51,0	53,0	53,0
débit méthode volumétrique (l/s)	10,6	12,8	13,7	19,6	21,6	24,5	24,2
débit méthode incomplète (l/s)	14,2	14,6	30,2	39,7	48,6	48,4	48,4
moyenne	12,4	13,7	22,0	29,6	35,1	36,4	36,3
écart type	1,77	0,90	8,27	10,04	13,49	11,96	12,11
précision (%)	71,38	86,87	24,71	32,19	23,18	34,38	33,24

Tableau 15 : Présentation de la comparaison des mesures de débit par méthode incomplète et volumétrique pour des hauteurs identiques

III.2.4.4.e.iii) Courbe de tarage finale

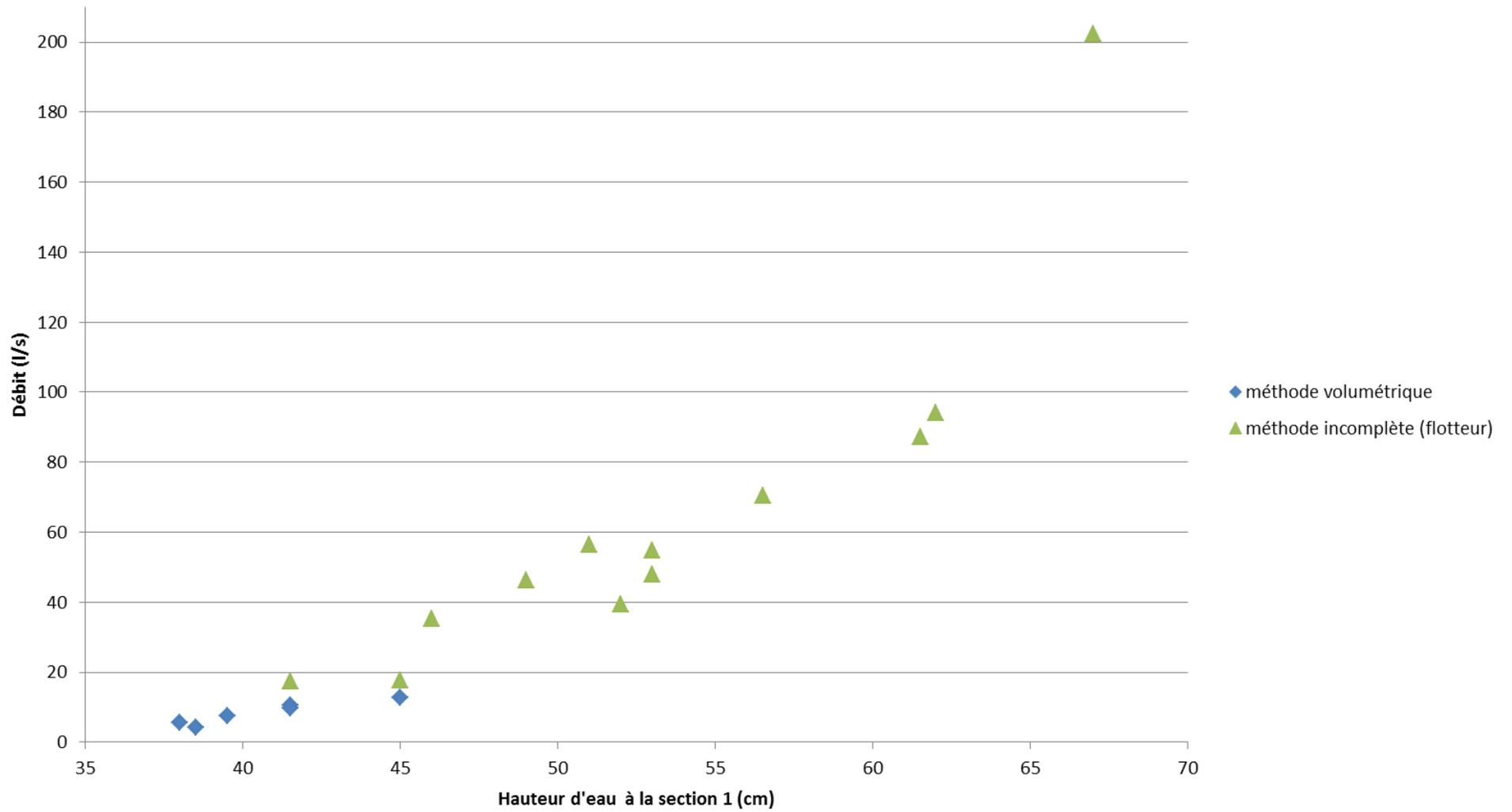
Pour la réalisation de cette courbe, 17 mesures de débit ont été utilisées pour une hauteur d'eau répartie de 38 à 67 cm, et dont 5 mesures proviennent de la méthode volumétrique (Graphique 8).

Cette courbe de tarage finale montre que les deux méthodes volumétrique et incomplète aux flotteurs peuvent être utilisées pour la création d'une même courbe de tarage. Cependant, l'analyse de chaque mesure doit être effectuée avant de pouvoir les prendre en compte dans cette courbe de tarage. Il est important de noter que cette courbe de tarage est un exemple de l'état actuel du fonctionnement hydrométrique du cours d'eau à l'endroit de la prise de mesures et en un temps donné. Cela signifie que cette courbe de tarage va évoluer si l'on effectue les mesures à un autre endroit du cours d'eau, et va aussi évoluer au cours du temps s'il y a une érosion des berges... De plus, cette courbe étant incomplète pour les raisons citées auparavant (III.2.4.2.a ; III.2.4.4.d.ii ; III.2.4.4.d.iii), l'équation de cette courbe n'a pas été réalisée. Enfin, il est nécessaire d'effectuer des travaux au sein de la station de mesures (tracé plus rectiligne de la station, diminution de l'effet de la courbe) et au niveau du barrage (diminution des fuites). Ces travaux vont avoir une influence, notamment sur la hauteur d'eau du cours d'eau et cela va modifier directement l'aspect de la courbe de tarage.

De ce fait, la courbe de tarage présentée dans ce rapport est un exemple qui ne correspondra pas à la future courbe de tarage qui devra être effectuée après les travaux. Une fois la courbe de tarage bien définie, il sera possible de déduire, à partir de cette même courbe, le débit, uniquement en faisant un relevé de la hauteur d'eau grâce au limnimètre. Cependant pour obtenir des mesures de débit en continu, l'achat d'un limnigraphe sera nécessaire.

Graphique 8 :

Courbe de tarage utilisant les deux méthodes volumétrique et incomplète



DISCUSSION ET PRECONISATIONS

Les objectifs initiaux ont été tenus, et de nombreuses idées ont été exposées durant ce stage afin d'améliorer les précédentes méthodologies présentées dans la première phase de l'expérimentation lancée par Anna LI-MARCHETTI. Cependant, des événements inattendus et le temps nous ont empêchés de réaliser tous nos projets : nous pensons qu'il serait intéressant de les reconduire pour de futurs stages.

Ainsi, il reste encore beaucoup à faire afin d'améliorer la méthodologie de relevé des précipitations et des débits. Il faut également que l'étude finale se déroule de la manière la plus continue possible, et, sur le long terme, - c'est-à-dire sur plusieurs dizaine d'années - afin de pouvoir constater l'influence d'un projet de reforestation sur les débits et la pluviométrie.

Dans le cadre de l'étude des précipitations :

Bien que les résultats soient précis avec une marge d'erreur faible, il serait utile de s'équiper de pluviomètres électroniques (pluviographes) permettant des mesures en continu. Cette disposition remplirait plusieurs rôles :

- mesurer la pluviométrie tout au long de l'année, permettant ainsi d'observer les phénomènes saisonniers, quelle que soit l'absence ou la présence de techniciens.
- supprimer les sources d'erreurs provenant de la récolte pendant un épisode pluvieux. On peut également éviter cette erreur en récoltant à la fin de l'épisode pluvieux, s'il reste court.
- pouvoir vérifier le temps de réponse du débit du cours d'eau face aux événements pluvieux.
- supprimer les sources d'erreurs provenant du technicien, telles que son indisponibilité, les mauvaises lectures, les pertes d'eau par transvasements répétés entre le collecteur de pluie et l'appareil de mesure. Cette dernière source d'erreur peut aussi être diminuée en faisant l'acquisition d'un appareil de mesure de capacité plus grande.

Cependant, la nécessité de déplacer et de disposer plus de pluviomètres sous le couvert forestier (en raison de résultats non représentatifs du couvert sous forestier) va rendre difficile l'acquisition de pluviographes. Il serait toutefois pertinent d'observer, durant un épisode pluvieux, si, sous couvert forestier, le temps de retombée des pluies y est décalé, voire plus long, ce qui permettrait d'expliquer de futurs changements de réponses du débit au cours de la reforestation. Par conséquent, l'emploi de seulement deux pluviographes peut être envisagé : l'un représentatif du milieu sous couvert forestier, l'autre représentatif du milieu au-dessus du couvert forestier. Les autres pluviomètres manuels seront toujours utilisés et permettront de placer le pluviographe sous couvert forestier dans un endroit représentatif de ce milieu.

De plus, la mise en place d'une méthode d'observation de la perte d'eau sous couvert forestier, par écoulement le long des troncs, peut être envisagée.

Enfin, l'étude devant se faire sur le long terme, il faudra comparer les résultats obtenus au sein du Parc avec d'autres pluviomètres situés à l'échelle régionale et nationale, dans le but de comprendre si les différences observées au sein du Parc ne sont pas uniquement des différences observées à l'échelle régionale et nationale, causées alors par un changement global du climat à plus grande échelle.

Concernant une meilleure compréhension du bassin versant et de son évolution :

Il se révélerait utile de travailler avec les différents acteurs qui y agissent, que ce soient les habitants, mais aussi le gouvernement, qui serait susceptible, par la suite, de fournir des documents tel que le MNT pour vérifier si la méthode utilisée dans ce rapport est fiable, ainsi que de calculer la pente moyenne du bassin versant.

Concernant la mesure du débit :

Il est primordial de trouver une solution pour traverser le cours d'eau Rio Puyo et cela, pour un budget acceptable, une tyrolienne semblant être le meilleur compromis trouvé pour le moment, malgré un prix toujours élevé.

Il serait utile de combler les fuites du barrage afin d'obtenir des mesures pour de plus faibles débits afin de compléter la courbe de tarage.

Dans le même temps, concernant la méthode incomplète, un travail peut être entrepris afin de rendre les berges plus parallèles, tout en les stabilisant au sein de la station de mesure.

De même, un « adoucissement » du virage en aval de la station de mesure devra être envisagé afin de réduire les effets de contre-courant.

La réalisation de ces travaux aura pour conséquence de modifier les paramètres hydrologiques au sein de la station de mesure (hauteur d'eau, vitesse, débit) et, par conséquent, l'établissement d'une nouvelle courbe de tarage sera obligatoire.

Dans le même temps, la mesure de l'aire des sections transversales devra de nouveau être réalisée. Face au caractère mobile des sédiments au fond du lit du cours d'eau, il sera nécessaire, chaque année, de recalculer les sections transversales. Il serait aussi envisageable, afin d'avoir une meilleure précision, de se baser sur l'aire de 3 sections transversales et non de 2 comme aujourd'hui.

La courbe de tarage devra également être réévaluée tous les 1 à 2 ans pour vérifier son exactitude.

Enfin, une fois la réalisation d'une courbe de tarage complète, l'acquisition et l'installation d'un limnigraphe afin d'obtenir des mesures de débit en continu pourront être envisagées. Une fois le limnigraphe installé, il sera possible de travailler avec les données récoltées par les pluviographes. Le prix du matériel étant élevé, une autre solution, bien moins précise et incomplète, serait encore de faire réaliser manuellement par un technicien, chaque année, les relevés de hauteurs d'eau qui serviront aux calculs du débit grâce à la courbe de tarage. Cependant, cette méthode ne pourra pas être effectuée en continu, et les conditions météorologiques, la saturation en eau des sols etc., d'une année sur l'autre, au moment de la prise de mesure, risquent d'être différents, rendant alors la comparaison des résultats impossible.

CONCLUSION

« Les forêts précèdent les peuples, les déserts les suivent »

François René de Chateaubriand

Des méthodologies ont été proposées et testées, ces méthodologies sont fonctionnelles bien que certaines nécessitent encore des améliorations, notamment pour la récolte des précipitations sous couvert forestier et la réalisation de la courbe de tarage complète. Les méthodologies apportent des résultats fiables avec des moyens restreints et un budget très faible, rentrant dans les capacités financières du Parc. Cependant, la connaissance du bassin versant et de son occupation des sols laisse penser que l'influence de la reforestation au sein du Parc sera difficile à mesurer, du fait de la faible surface dédiée à la reforestation comparée à la surface totale du bassin versant. Il faut ajouter que le projet de reforestation a déjà commencé plusieurs années auparavant, ce qui a empêché de connaître l'état initial du bassin versant - état qui est nécessaire en vue de mieux percevoir l'influence de cette reforestation.

La méthode de collecte de précipitations au sein du Parc est une méthode nouvelle qui n'avait pas été proposée auparavant. Le climat de la région étant très favorable à ce genre d'étude, et les résultats pouvant par la suite expliquer en partie la mesure des débits au cours du temps, cette étude doit être poursuivie. Les résultats obtenus sont très encourageants, même s'ils ont été collectés sur une très courte période. Ainsi, il semblerait y avoir, sur la période étudiée, plus de précipitations au-dessus du couvert forestier qu'en milieu prairial, ce que semblent également montrer d'autres études effectuées sur le sujet.

Pour la partie descriptive du bassin versant et cours d'eau, l'avancée des résultats, comparée à l'année dernière, est conséquente, étant donné qu'aucune recherche sur le sujet n'avait pu être entreprise dans le rapport d'Anna LI-MARCHETTI. Cela s'est fait notamment grâce à l'autorisation de passage dans les propriétés voisines, ainsi qu'à l'utilisation du GPS qui a permis de cartographier la zone sans utiliser la méthode du MNT.

Cependant, le fait que le bassin versant s'étende sur une superficie plus large que le Parc Los Yapas en lui-même peut poser problème. En effet, les propriétaires des autres terrains, étant libres sur leur propre terrain, risquent, en l'absence de concertation avec eux, de modifier l'occupation des sols : cela pourrait influencer sur les résultats de débits obtenus au cours du temps. Ainsi, le propriétaire du terrain où apparaît la source, a fait état de son désir de couper le bois se situant en amont direct de la source afin de le remplacer par de la Gramalote. Le bois pouvant être à l'origine directe de la source du rio Los Yapas, cette coupe pourrait avoir des conséquences durables sur l'hydrologie du bassin versant. Il est donc crucial de continuer le dialogue avec ce propriétaire. Bien que, pour le moment, aucune propriété du bassin versant ne soit concernée, de plus en plus de propriétaires voisins, dont les terrains servaient de pâturages, les ont vendus pour des projets immobiliers de construction de lotissements. Il sera donc important de suivre l'évolution de ce phénomène et éviter que cela ne se produise au sein du bassin versant. Enfin, la surface du Parc au sein du bassin versant ne représente que 18,5% du total. Par conséquent, le projet de reforestation ne s'effectuant qu'au sein du Parc, il sera plus difficile à détecter au travers des mesures de débits. C'est pour cela que le rôle éducatif au sein du Parc et le contact avec la population locale sont importants ; ils encourageraient les initiatives de reforestations et notamment au sein du bassin versant, ce qui pourrait permettre une hausse de la représentativité du projet de reforestation. Cependant, si par manque de soutien des propriétaires voisins, le projet de reforestation ne s'étendait pas, les évolutions supposées observées au sein du débit au cours du temps permettraient néanmoins de montrer l'impact fort de la reforestation malgré sa faible surface.

La mesure de débit avait déjà en partie été effectuée l'année dernière. Les conditions alors rencontrées sur le terrain n'avaient pas permis de faire des mesures en période de forte crue ; ces résultats étaient peu nombreux et peu probants, sans aucun relevé de hauteur d'eau. Face à la destruction de l'ouvrage utilisé par Anna LI-MARCHETTI, aucune comparaison n'a pu être effectuée avec les mesures réalisées cette année. Aujourd'hui, toujours face à l'impossibilité de franchir le Rio Puyo en période de crue, d'autres contraintes se sont ajoutées, avec des fuites au sein du barrage, gênant ainsi les mesures de débit. Malgré ces contraintes, des résultats plus complets ont été obtenus, grâce à l'utilisation des deux méthodologies complémentaires volumétrique et incomplète aux flotteurs. Les résultats sont encore à améliorer afin de réaliser la courbe de tarage. Les travaux à réaliser rendront la courbe de tarage effectuée caduque, cependant les méthodologies décrites dans ce rapport permettront de continuer jusqu'à réaliser un relevé continu du débit grâce à un limnigraphe.

Pour conclure, malgré un sujet d'étude complexe, qui a présenté de nombreux imprévus et un manque récurrent de moyens, je retiens de nombreux aspects positifs : la nécessité de faire preuve d'une grande capacité d'adaptation, l'obtention de résultats fiables qui permettent la poursuite de la recherche ainsi que la portée environnementale et scientifique de ce projet dont le sens me tient à cœur.

BIBLIOGRAPHIE

ALDEGHERI M., 1979 - *Manuel d'Hydrométrie Tome IV mesure des débits à partir des vitesses*. O.R.S.T.O.M. Editeur, I.S.B.N. 2-7099-0546-9, 313 p. Disponible sur : « http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/Idt/09690.pdf » (consulté le 19/03/2014).

ALLEN K.R., 1951 - *The Horokiwi stream. Fisheries Bulletin*, Rep. No. 10, New Zealand Marine Department, Wellington, 231 p.

ANDRÉASSIAN V., 2002 - *Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants*. Thèse de doctorat de l'université Paris 6, 275 p. Disponible sur : « <http://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/07/2002-ANDREASSIAN-THESE.pdf> » (consulté le 04/05/2014).

AUSSENAC G., 1968 - *Interception des précipitations par le couvert forestier*. Annales des Sciences Forestières, 25, 3, pp. 135-156. Disponible sur : « <http://www.afs-journal.org/> » (consulté le 27/08/2014).

AUSSENAC G., 1970a - *Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations*. Ann.Sci.forest., 27(4), pp. 383-399. Disponible sur : « <http://www.afs-journal.org/> » (consulté le 02/06/2014).

AUSSENAC G., 1970b - *Aperçu du rôle de la forêt sur l'économie de l'eau*. Revue forestière française, vol. XXII, n° 6, pp. 603-618.

AVISSAR R., LIU Y., 1996 - *Three-dimensional numerical study of shallow convective clouds and precipitation induced by land surface forcings*. Journal of Geophysical Research, 101: pp. 7499-7518.

BALDOCCHI D.D., MATT D.R., MC MILLEN R.T., HUTCHISON B.A., 1985 - *Evaporation from an Oak-Hickory forest*. - *Advances in Evaporation*. Proceedings of the nat. conference of Chicago, pp. 414-440.

BERGER A., 1992 - *Le Climat de la Terre*. Bruxelles : de Boeck Université. 499 p.

BOCHKOV A.P., 1959 - *The elements of water balance in the forest and on the field. The forest and the river runoff*. Assemblée générale de Hannoversch-Münden, 1. AIHS publ., n° 48, pp. 174-181.

BOCHKOV A.P., 1970 - *Influence des forêts sur le débit des cours d'eau*. Nature et Ressources, vol. 6, n° 1, pp. 11-13.

BRUIJNZEEL L.A., 1990 - *Hydrology of moist tropical forests and effects conversion : a state of knowledge review*. Unesco, IHPA, Publication of the Humid Tropics Programme, 224 p. Disponible sur : « <http://unesdoc.unesco.org/images/0009/000974/097405eo.pdf> » (consulté le 22/08/2014).

BRUIJNZEEL L.A., 1991 - *La conversion des forêts tropicales: répercussions hydrologiques*. Nature & Ressources, 27 (2): pp. 36-46.

BRUIJNZEEL L.A., 2004 - *Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 104: pp. 185-228. Disponible sur : « http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuenas/documentos/Funciones_hidrologicas_de_las_coberturas_forestales.pdf » (consulté le 22/08/2014).

CALDER I.R., 2005 - *Blue revolution – integrated land and water resources management*. Londres, Royaume-Uni, Earthscan. (2° éd.).

CALDER I.R., 2007 - *Forests and water – ensuring forest benefits outweigh water costs*. Forest Ecology and Management, 251: pp. 110-120.

CALDER I., HOFER T., VERMONT S., WARREN P., 2007 - *Vers une nouvelle compréhension des arbres et des forêts*. F.A.O. Unasylva 229, Vol. 58, pp. 3-10. Disponible sur : « <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1598f/a1598f00.pdf> » (consulté le 29/07/2014).

CEPEL N., 1967 - *Interzeption (= Niederschlagsverdunstung im Kronenraum) in einem Buchen -, einem Eichen - und einem Kiefernbestand des Belgrader Waldes bei Istanbul*. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 5, 86, pp. 301-314.

CHEN F., AVISSAR R., 1994 - *Impact of land-surface moisture variability on local shallow convective cumulus and precipitation in large-scale models*. Journal of Applied Meteorology, 33: pp. 1382-1401.

COSANDEY C., 2006 - *De la forêt à l'eau, Conséquences des forêts sur l'écoulement annuel des cours d'eau*. Rev. For. Fr. LVIII-4, pp. 318-328. Disponible sur : « http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/6702/150_DPI_317_328.pdf?sequence=1 » (consulté le 10/06/2014).

DELACOSTE M., BARAN P., LEK S., LASCAUX J.M., 1995 - *Classification et clé de détermination des faciès d'écoulement en rivières de montagne*. Bull. Fr. Pêche Piscic., 337/338/339, pp. 149-156. Disponible sur : « <http://www.kmae-journal.org/articles/kmae/pdf/1995/02/kmae199533733833914.pdf> » (consulté le 09/06/2014).

DESCROIX L., ESTRADA J., GONZALEZ BARRIOS J.L., VIRAMONTES D., 2005 - *La Sierra Madre occidentale Un château d'eau menacé « Influence de la forêt sur la pluviométrie »*, IRD Editions, Latitudes 23 coll. ISBN : 9782709915823, 327 p. Disponible sur : « http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-07/010035037.pdf » (consulté le 04/05/2014).

DURIEUX L., TOLEDO MACHADO L. A., LAURENT H., 2003 - *The impact of deforestation on cloud cover over the Amazon arc of deforestation*. Remote Sensing of Environment 86, pp. 132-140. Disponible sur : « http://www.amma-catch.org/publication/scientific_publication_doc/Durieux_2003_RSE.pdf » (consulté le 27/08/2014).

ELTAHIR E.A.B., BRAS R.L., 1994 - *Precipitation recycling in the Amazon basin*, Q.J.R. Meteorol. Soc., 120, pp. 861-880. Disponible sur : « http://web.mit.edu/eltahir/www/Publications_files/1994%20Eltahir%20Bras%20precip%20recy%20Amazon%20basin%20QJRMetSoc.pdf » (consulté le 22/08/2014)

ESCOURROU G., 1981 - *Climat et environnement: les facteurs locaux du climat*. Paris Masson, coll. géographie, 180 p.

ESPINOZA VILLAR J.C., RONCHAIL J., LAVADO W., CARRANZA J., COCHONNEAU G., DE OLIVEIRA E., POMBOZA R., VAUCHEL P., GUYOT J.L., 2010 - *Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional. Un enfoque particular sobre la región andina Spatio-temporal*. REVISTA PERUANA GEO-ATMOSFÉRICA RPGA (2), pp. 99-130. Disponible sur « http://www.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2010_vol02/art9.pdf » (consulté le 04/06/2014).

FORRAY N., AUER J.C., BROCHOT J.F., ERAUD Y., FAVRIAUX A., GHIO M., LALLEMENT C., LANG M., ODIER M., SCHERER C., 1998 - *Charte qualité de l'hydrométrie, Code de bonnes pratiques*. Ministère de l'Environnement, Banque HYDRO, 49 p. Disponible sur : « <http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/Charte-fr.pdf> » (consulté le 22/08/2014).

FRIES A., *Estaciones climáticas en ecuador*. Perspectivas desde la ciencia.

FRITSCH J.M., 1992 - *Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en Guyane française*. Editions de l'ORSTOM, Collection Etudes et THESES, 392 p. Disponible sur : « http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_2/etudes_theses/35059.pdf » (consulté le 07/07/2014).

GAMBINO S., 2000 - *La sierra se está secando*. Revista de Coahuila : pp. 26-27.

GOBIERNO PARROQUIAL DE FÁTIMA, 2011 - *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Parroquial FATIMA 2022*. GADPRF; Gobierno Parroquial de FATIMA, 294 p.

HOPPE E., 1896 - *Regenmessung unter Baumkronen. Mitteilungen aus dem forstlichen Versuchswesen Österreich*, pp. 21-75.

IRWIN J.G., CAMPBELL G.W., CAPE J.N., CLARK P.A., DAVIES T.D., DERWENT R.G., FISHER B.E.A., FOWLER D., KALLEND A.S., LONGHURST J.W.S., MARTIN A., SMITH F.B., WARRILOW D.A., 1990 - *Acid deposition in the United Kingdom 1986—1988*, third report of the United Kingdom Review Group on Acid Rain, 124 p.

JACCON G., 1987 - *Manuel d'hydrométrie ORSTOM - Tome V – Tracé de la courbe de tarage et calcul des débits*. IRD Orstom, ISBN : 2-7099-0866-2.

JOWETT I.G., 1993 - *A method for objectively identifying pool, run and riffle habitats from physical measurements*. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 27, pp. 241-248. Disponible sur : « <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00288330.1993.9516563> » (consulté le 22/08/2014).

KESTENS Y., 2000 - *Les conséquences de la déforestation sur le cycle hydrologique: une étude de cas, bassin versant de la Haute Srepok, Vietnam*. Mémoire, Bibliothèque nationale du Canada. 100 p. Disponible sur : « <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/ftp01/MQ53959.pdf> » (consulté le 09/07/2014).

KOTODA K., 1989 - *Estimation of river basin evapotranspiration from consideration of topography and land use conditions*. In : *Estimation of the areal evapotranspiration*. AIHS, n° 177, pp. 271-281. Disponible sur : « http://ks360352.kimsufi.com/redbooks/a177/iahs_177_0271.pdf » (consulté le 22/08/2014).

KRESTOVSKY O.I., FEDOROV S.F., 1970 - *Study of water balance element of forest and field watersheds*. Proceedings of the Reading symposium on World Water Balance, (cité par Agence financière de Bassin Seine-Normandie, 1979).

LAMBERT R., 1996 - *Géographie du cycle de l'eau*. Toulouse : Presses universitaires du Mirail, 439 p.

LAVABRE J., ANDREASSIAN V., 2000 - *La forêt, un outil de gestion des eaux?* Antony, Cemagref Éditions, 120 p.

LEOPOLD L.B., WOLMAN M.G., MILLER J. P., 1964 - *Fluvial processes in Geomorphology*. San Francisco, 522 p.

LINDQUIST E.J., D'ANNUNZIO R., GERRAND A., MACDICKEN K., ACHARD F., BEUCHLE R., BRINK A., EVA H.D., MAYAUX P., SAN-MIGUEL-AYANZ J. & STIBIG H.-J., 2012 - *FAO & JRC. Global forest land-use change 1990–2005*. FAO Forestry Paper No. 169. Food and Agriculture Organization of the United Nations and European Commission Joint Research Centre. Rome, FAO, 40 p. Disponible sur : « <http://www.fao.org/docrep/017/i3110e/i3110e.pdf> » (consulté le 19/03/2014).

MALAVOI J.R., SOUCHON Y., 1989 - *Méthodologie de description et quantification des variables morphodynamiques d'un cours d'eau à fond caillouteux. Exemple d'une station sur la Filière (Haute Savoie)*. Revue de Géographie de Lyon, 64, pp. 252-259.

MALAVOI J.R., SOUCHON Y., 2001 - *Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques*. Bull. Fr. Pêche Piscic. (2002) 365/366 : pp. 357-372.

MORELL M., 1986 - *Influence de la topographie et de l'exposition aux vents dominants sur les mesures des précipitations*, deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier, 16-17 octobre 1986, collection Colloques et Séminaires, ORSTOM, Paris, pp. 66-87. Disponible sur : « http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_4/colloques/25962.pdf » (consulté le 16/06/2014).

MOSLEY M.P., 1982 - *A procedure for characterising river channels*. Water and soil miscellaneous publication, Rep. No. 32, Ministry of Work and Development, Wellington, 90 p.

NOBRE C., SELLERS P., SHUKLA J., 1991 - *Amazonian deforestation and regional climate change*. Journal of Climate, 4: pp. 957-988. Disponible sur : « <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281991%29004%3C0957%3AADARCC%3E2.0.CO%3B2> » (consulté le 04/08/2014).

ORGANISATION METEOROLOGIQUE MONDIALE, 1994 - *Guide des pratiques hydrologiques – Cinquième éditions – Acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications*. OMM-N° 168, ISBN 92-63-25168-1, 793 p. Disponible sur : « http://hydrologie.org/BIB/OMM/WMOFRA_v5.pdf », (consulté le 26/08/2014).

RAPP, M. et IBRAHIM M., 1978 - *Egouttement, écoulement et interception des précipitations par un peuplement de Pinus pinea L.* *Oecol. Plant.* 13(4), pp. 321-330.

RICARD J., 2002 - *Guide pratique illustré. Conception, construction et équipement de station limnimétrique et piézométrique pour le contrôle de niveau des eaux souterraines*. Rapport BRGM/RP-51468-FR – 30 p. Annexes 22 p. Disponible sur : « <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-51468-FR.pdf> » (consulté le 13/03/2014).

ROCHE M., 1963 - *Hydrologie de Surface*. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (Paris), Gauthier-Villars Editeur. 430 p. Disponible sur : « http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-11/02081.pdf » (consulté le 02/07/2014).

RODIER J.A., 1970 - *Les Jaugeages au moulinet et au flotteur à l'heure du calcul automatique*. Colloque International sur l'Hydrométrie, O.R.S.T.O.M., pp. 1-8. Disponible sur : « <http://unesdoc.unesco.org/images/0000/000064/006429mo.pdf> » (consulté le 19/03/2014).

SAINT PIERRE (DE), B.J.H., 1787 - *Études de la Nature*, 2. Paris, Imprimerie de Monsieur.

SHUKLA J., NOBRE C., SELLERS P., 1990 - *Amazon deforestation and climate change*. Science, 247: pp. 1322-1325. Disponible sur: « http://lightning.sbs.ohio-state.edu/geog5921/paper_landcover_Shukla1990.pdf » (consulté le 16/06/2014).

SHUTTLEWORTH W.J., 1988 - *Evaporation from Amazonian rain forest*. Philosophical Trans. of the Royal Soc., London, Ser. B, 233 , pp. 321-346.

SILVA DIAS M., RUTLEDGE S., KABAT P., SILVA DIAS P., NOBRE C., FISCH G., DOLMAN A., ZIPSER E., GARSTANG M., MANZI A., FUENTES J., DA ROCHA H., MARENGO J., PLANA-FATTORI A., S'A L., ALVAL'A R., ANDREA E M., ARTAXO P., GIELOW R., GATTI, L., 2002 - *Cloud and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon Region*. Journal of Geophysical Research, 107: DOI 10.1029/2001JD000335.

SZABO M., 1975. — *Net precipitation in a Hungarian oak forest ecosystem*. Acta Botanica Academia Scientiarum Hungaricae, 21, (I -2), pp. 151 - 165.

ULRICH E., LELONG N., LANIER M., SCHNEIDER A., 1995 - *Interception des pluies en forêt : facteurs déterminants. Interprétation des mesures réalisées dans le sous-réseau CATAENAT C) de RENECOFOR (2)* Office National des Forêts, bulletin technique n°30, pp. 33-44. Disponible sur : « https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/publis/Ulrich_et_al_1995.pdf » (consulté le 20/04/2014)

VAN DIJK A.I.J.M. et KEENAN R., 2007 - *Planted forests and water in perspective*. Forest Ecology and Management, 251(1-2): pp. 1-9. Disponible sur: « ftp://141.30.162.171/julich/literature/dijk_2007_ForEcolManag_planted_forests_and_water.pdf » (consulté le 02/07/2014).

VED I.P., 1978 - [*Sols et écologie des régions forestières de l'URSS*]. Traduction du Laboratoire "Intergéo". - Tzsvestiga Zkademii Nauk S.S.S.R., serija geographiceskaja, 2, pp. 79-84.

WALLACE J.S., OLIVER H.R. 1990 - *Vegetation and hydroclimate*. In : Process studies in hillslope hydrology / M.G. Anderson & T.P. Burt (Eds). - Chichester : John Wiley.

WANG J., BRAS R., ELTAHIR E., 2000 - *The impact of observed deforestation on the mesoscale distribution of rainfall and clouds in Amazonia*. Journal of Hydrometeorology, 1: pp. 267-286. Disponible sur : «

<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1525-7541%282000%29001%3C0267%3ATIOODO%3E2.0.CO%3B2> » (consulté le 15/06/2014).

YANG C.T., 1971 - *Formation of riffles and pools. Water Resources Research*, 7, pp. 1567-1574.

SOURCES INTERNETS:

http://www.activagps.com/Magellan-eXplorist-500_462.htm (19/05/2014)

http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/02/INFORME-DE-RENDICI%C3%93N-DE-CUENTAS-2012_Final-Firmado.pdf (10/07/2014)

<http://www.amazon.fr/500-Eprouvette-Gradu%C3%A9e-Plastique-Transparent/dp/B0092KI13C> (25/08/2014)

<http://dbhsarl.eu/forum/viewtopic.php?f=3&t=1025> (28/04/2014)

<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html> (11/04/2014)

<http://www.emallerie-normande.com/product/fabrication-echelle-de-crue-limnometrique-acier-emaille-niveau-de-riviere-mer> 10/04/2014)

<http://www.fao.org/docrep/t0178f/t0178f03.htm#2.1%20Les%20arbres%20et%20le%20microclimat> (13/03/2014)

<http://www.fao.org/forestry/fra/fra2010/fr/> (06/07/2014)

<http://www.lacompagniedesanimaux.com/seringue-20-ml-a-l-unite.html?gclid=CJjSw5DdrsACFU7MtAodmmsAhQ> (25/08/2014)

<http://losyapas.com/> (20/03/2014)

<http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/3C.htm#3.1.2> (07/07/2014)

<http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/4C.htm#4.1> (07/07/2014)

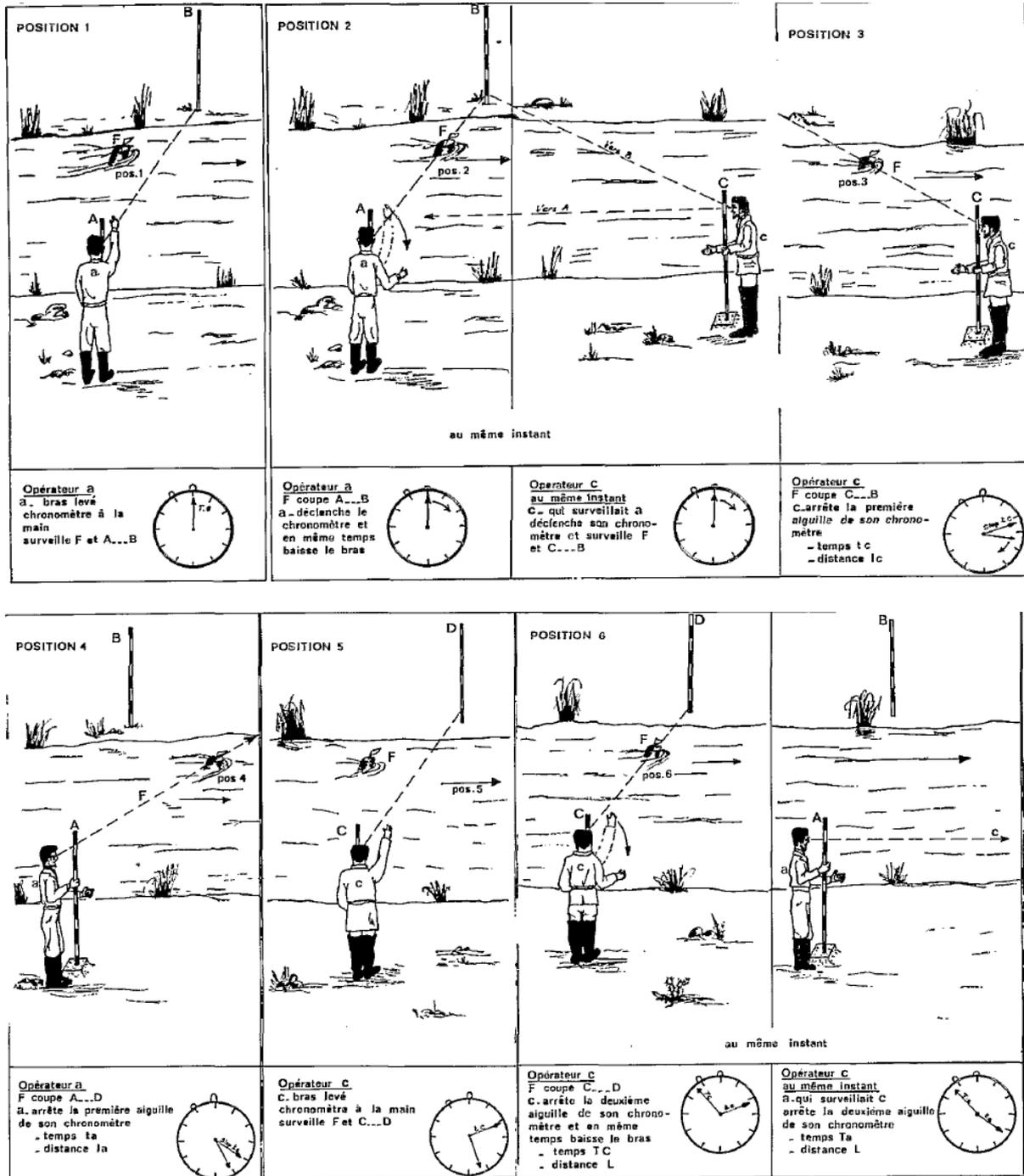
<http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/5C.htm> (13/11/2013)

<http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/6C.htm> (13/03/2014)

<http://www.meteofrance.com/climat/france/dijon/21473001/relevés> (13/05/2014)

<http://www.rueducommerce.fr/m/ps/mpid:MP-7033AM231599#moid:MO-62A68M14973304> (25/08/2014)

ANNEXES



Annexe 1 : Figure montrant l'utilisation de la méthode de calcul de vitesse par utilisation de deux chronomètres à aiguilles ratrapantes. Tiré de ALDEGHERI M. (1979) fig 59 bis

Annexe 2 : Extraits et exemples des résultats des précipitations récoltées journalièrement

semaine	S8														S9															
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D		
date	19/05/2014	20/05/2014	21/05/2014	22/05/2014	23/05/2014	24/05/2014	25/05/2014	26/05/2014	27/05/2014	28/05/2014	29/05/2014	30/05/2014	31/05/2014	01/06/2014	19/05/2014	20/05/2014	21/05/2014	22/05/2014	23/05/2014	24/05/2014	25/05/2014	26/05/2014	27/05/2014	28/05/2014	29/05/2014	30/05/2014	31/05/2014	01/06/2014		
Pluvio 1 (foret sous-bois 1) (l/m ²)	12,793	27,554	0,01514	7,948	9,992	1,968	2,044	17,108	34,140	18,016	5,223	2,347	6,510	18,168	23,693	12,793	27,554	0,01514	7,948	9,992	1,968	2,044	17,108	34,140	18,016	5,223	2,347	6,510	18,168	23,693
Pluvio 2 (foret sous-bois 2) (l/m ²)	12,490	22,482	0,03028	9,311	10,446	1,514	2,347	7,116	18,016	18,016	7,343	2,801	6,132	20,741	26,570	12,490	22,482	0,03028	9,311	10,446	1,514	2,347	7,116	18,016	18,016	7,343	2,801	6,132	20,741	26,570
Pluvio 3 (foret cime) (l/m ²)	13,701	23,769	0,00000	9,916	11,052	2,271	1,892	8,251	18,849	18,849	6,737	1,514	6,434	14,912	27,857	13,701	23,769	0,00000	9,916	11,052	2,271	1,892	8,251	18,849	18,849	6,737	1,514	6,434	14,912	27,857
Pluvio 4 (prairie) (l/m ²)	14,231	27,554	0,00757	8,857	9,159	2,195	1,987	10,087	22,823	8,156	2,309	5,658	17,392	26,646	0,606	14,231	27,554	0,00757	8,857	9,159	2,195	1,987	10,087	22,823	8,156	2,309	5,658	17,392	26,646	0,606
MOYENNE JOURNALIERE (l/m ²)	13,304	25,340	0,01325	9,008	10,162	1,987	1,968	10,087	22,823	8,156	2,309	5,658	17,392	26,646	0,606	13,304	25,340	0,01325	9,008	10,162	1,987	1,968	10,087	22,823	8,156	2,309	5,658	17,392	26,646	0,606
P3-P4 (l/m ²)	-0,530	-3,785	-0,00757	1,060	1,892	0,076	0,454	-0,378	1,438	0,606	1,287	-0,303	0,833	0,606	0,606	-0,530	-3,785	-0,00757	1,060	1,892	0,076	0,454	-0,378	1,438	0,606	1,287	-0,303	0,833	0,606	0,606
MOYENNE SEMAINE P1 (l/m ²)	8,902														16,502															
MOYENNE SEMAINE P2 (l/m ²)	8,266														11,939															
MOYENNE SEMAINE P3 (l/m ²)	9,008														12,663															
MOYENNE SEMAINE P4 (l/m ²)	9,128														12,079															

date	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L
	01/07/2014	02/07/2014	03/07/2014	04/07/2014	05/07/2014	06/07/2014	07/07/2014	08/07/2014	09/07/2014	10/07/2014	11/07/2014	12/07/2014	13/07/2014	14/07/2014
Pluvio 1 (foret sous-bois 1) (l/m ²)	4,163	7,418	0,22709	12,944	3,936	1,514	5,072	11,657	1,892	8,857	0	12,793	40,574	40,574
Pluvio 2 (foret sous-bois 2) (l/m ²)	4,996	11,582	0,09084	13,777	2,801	1,135	3,785	9,387	1,514	7,494	0	15,064	32,550	32,550
Pluvio 3 (foret cime) (l/m ²)	3,709	6,510	0,34064	14,685	3,709	2,120	5,147	8,100	1,590	7,570	0	11,582	34,670	34,670
Pluvio 4 (prairie) (l/m ²)	2,574	6,964	0,06558	12,187	3,406	2,347	5,375	7,721	1,514	8,024	0	10,825	34,064	34,064
MOYENNE JOURNALIERE (l/m ²)	3,861	8,119	0,31604	13,399	3,463	1,779	4,845	9,216	1,628	7,986	0	12,566	35,464	35,464
P3-P4 (l/m ²)	1,135	-0,454	-0,26494	2,498	0,303	-0,227	-0,227	0,378	0,076	-0,454	0	0,757	0,606	0,606

Annexe 3 : Résultats des précipitations récoltées journalièrement et étant inférieur à 1 l/m²

L/m ²	D	V	S	D	V	M	D	L	M	M	J	S	D	J
	30/03/2014	11/04/2014	12/04/2014	13/04/2014	25/04/2014	30/04/2014	04/05/2014	05/05/2014	21/05/2014	21/05/2014	04/06/2014	07/06/2014	15/06/2014	03/07/2014
Pluvio 1 (foret sous-bois 1)	0,0227	0,1665	0,0076	0,0000	0,0378	0,2120	0,0303	0,0000	0,0000	0,0151	0,4845	0,0151	1,3626	0,2271
Pluvio 2 (foret sous-bois 2)	0,0151	0,1211	0,0000	0,0000	0,0454	0,2120	0,0151	0,0000	0,0000	0,0303	0,7721	0,0227	1,5140	0,0908
Pluvio 3 (foret cime)	0,0378	0,3558	0,0454	0,0606	0,0606	0,5980	0,1817	0,0076	0,0000	0,8251	0,3558	0,0908	0,9841	0,3406
Pluvio 4 (prairie)	0,0076	0,2498	0,0000	0,0000	0,0378	0,2498	0,1135	0,2649	0,0076	0,7797	0,1438	0,0454	0,1135	0,6056
MOYENNE JOURNALIERE	0,0208	0,2233	0,0132	0,0151	0,0454	0,3179	0,0852	0,0681	0,0132	0,7153	0,1381	0,0435	0,9935	0,3160
Marge d'erreur (0,5 ml)	0,00757													

Annexe 4 : Résultats (en bleu) des précipitations récoltées journalièrement après les périodes sèches inférieures à 1 l/m² (en orange)

l/m ²	25/04/2014	26/04/2014	30/04/2014	01/05/2014	04/05/2014	05/05/2014	06/05/2014	16/05/2014	17/05/2014	18/05/2014	19/05/2014	21/05/2014	22/05/2014	04/06/2014	05/06/2014	06/06/2014	11/06/2014	12/06/2014	16/06/2014	17/06/2014	03/07/2014	04/07/2014
	pluviomètre 1	7,191	6,813	6,813	6,813	6,813	0,0303	0	21,725	0	40,725	1,5897	12,793	7,948	0,4945	0,0303	3,255	0	23,845	0	7,570	0,2271
pluviomètre 2	6,510	6,510	6,510	6,510	6,510	0,0151	0	15,745	0	60,407	1,3626	12,490	9,311	0,7721	0,0227	4,315	0	22,179	0	9,462	0,0908	13,777
pluviomètre 3	6,132	6,132	6,132	6,132	6,132	0,0076	0	17,562	0	44,586	2,2709	13,701	0	8,251	0,3558	4,996	0	18,697	0	6,964	0,3406	14,685
moyenne P1	14,481														16,101							
moyenne P2	16,101														14,579							
moyenne P3	14,579														14,579							
marge d'erreur	+ou- 0,0076														+ou- 0,0076							
marge d'erreur	+ou- 0,076														+ou- 0,076							

Annexe 5 : Extraits et exemples de mesure de débit par la méthode volumétrique

date (2014)	03-juin		04-juin		05-juin		08-juin		16-juin		17-juin		18-juin		23-juin		26-juin		27-juin		
	tube n°1	tube n°2	tube n°1	tube n°2	tube n°1	tube n°2	tube n°1	tube n°2	tube n°1	tube n°2	tube n°1	tube n°2	tube n°1	tube n°2	tube n°1	tube n°2	tube n°1	tube n°2	tube n°1	tube n°2	
utilisation des tubes																					
essai 1 (m³/s)	0,01238	0,01283	0,01230	0,01142	0,00668	0,00606	0,00210	0,00213	0,00974	0,00938	0,00500	0,00483	0,00380	0,00373	0,01027	0,00985	0,00129	0,00127	0,00271	0,00268	
essai 2 (m³/s)	0,01218	0,01230	0,01283	0,01152	0,00653	0,00626	0,00216	0,00211	0,01047	0,00948	0,00516	0,00474	0,00391	0,00367	0,01054	0,00985	0,00131	0,00126	0,00273	0,00268	
essai 3 (m³/s)	0,01221	0,01155	0,01325	0,01116	0,00670	0,00621	0,00216	0,00211	0,01021	0,00943	0,00506	0,00453	0,00375	0,00375	0,01093	0,00948	0,00130	0,00126	0,00285	0,00277	
moyenne (m³/s)	0,01226	0,01223	0,01279	0,01137	0,00663	0,00618	0,00214	0,00212	0,01014	0,00943	0,00507	0,00470	0,00382	0,00372	0,01058	0,00973	0,00130	0,00126	0,00277	0,00271	
écart-type (m³/s)	0,00009	0,00053	0,00039	0,00015	0,00008	0,00009	0,00003	0,00001	0,00030	0,00004	0,00006	0,00012	0,00006	0,00003	0,00027	0,00017	0,00001	0,00000	0,00006	0,00004	
débit total (addition moyenne tube) (l/s)	24,5		24,2		12,8		4,3		19,6		9,8		7,5		20,3		2,6		5,5		
HAUTEUR section 1 (cm)	53		53		45		38,5		49		41,5		39,5		49		33		38		
HAUTEUR section 2 (cm)	77		77		69,5		62		73		67		65		74		61		64		

Annexe 6 : Extraits et exemples de mesure de débit par la méthode incomplète aux flotteurs

date (2014)	02-juin	03-juin	04-juin	05-juin	11-juin	15-juin	16-juin	27-juin	29-juin
HAUTEUR section 1 (cm)	67	53	53	45	51	62	49	38	47
HAUTEUR section 2 (cm)	90,5	77	77	69,5	76	86	73	64	73,5
essai 1 (s)	26,37	63,13	45,57	292,72	57,72	54,72	64,31	74,53	26,31
essai 2 (s)	17,18	41,07	37,82	244,03	104,28	36,31	64,59	91,82	34,37
essai 3 (s)	21,16	50,41	56,41	137,03	58,69	38,91	71,19	48,07	35,13
essai 4 (s)	20,66	80,81	106,56	149	47,75	32,78	54,91	58,84	108,72
essai 5 (s)	32,53	53,19	46,56	190,93	47,75	52,03	61,94	45,75	65,12
essai 6 (s)	17,79	114,91	170,13	176,06	62,59	51,53	80,69	49,1	79,25
essai 7 (s)	17,62	50	75,47	83,75	51,75	52,19	60	47,72	55,78
essai 8 (s)	24,35	61,13	51,69	80,06	55,44	34,53	105,62	54,66	37,5
MOYENNE	22,208	64,331	73,776	169,198	60,746	44,125	70,406	58,811	55,273
Ecart-type	4,972	22,096	41,803	68,981	17,171	8,687	15,155	15,236	26,282
vitesse (m/s)	0,180	0,062	0,054	0,024	0,066	0,091	0,057	0,068	0,072
Aire section 1 (m²)	1,067	0,778	0,778	0,618	0,738	0,958	0,698	0,478	0,658
Aire section 2 (m²)	1,743	1,426	1,426	1,261	1,404	1,635	1,338	1,14	1,349
Aire total (m²)	1,405	1,102	1,102	0,9395	1,071	1,2965	1,018	0,809	1,0035
Débit finale (l/s)	202,45	54,82	47,80	17,77	56,42	94,02	46,27	44,02	58,10

Récupération de sources d'eau et de la biodiversité à partir de la reforestation et son impact sur l'environnement

Poursuite et améliorations méthodologiques de la prise de mesure du débit d'un cours d'eau équatorien dans le cadre d'un projet de reforestation dans le Parc Los Yapas

Résumé :

La déforestation mondiale se poursuit, progressant en Equateur. Le Parc botanique équatorien Los Yapas, à la frontière de la forêt amazonienne, a pour projet la reforestation de 25 ha anciennement déforestés puis utilisés comme pâturages. Ce projet scientifique a pour but de restaurer la biodiversité et de montrer à la population locale les avantages que l'on peut tirer de tels projets. En 2013, Anna LI-MARCHETTI avait effectué un rapport sur l'impact de la reforestation sur la biodiversité et cherchait à vérifier la récupération de sources d'eau à travers la reforestation. Or ce dernier point, qui nécessitait la mesure de débit d'un cours d'eau (Los Yapas), face à plusieurs contraintes, n'avait pas pu fournir de résultats suffisants. Ce rapport porte donc sur l'amélioration et la proposition de nouvelles méthodologies dans le cadre de ce projet. Ainsi, un nouveau suivi sur les précipitations et des améliorations méthodologiques de mesure du débit du cours d'eau Los Yapas ont été entrepris. La connaissance du bassin versant Los Yapas a été également approfondie. Ces améliorations ont eu lieu dans le contexte d'un budget réduit ; les méthodologies, les plus simples possibles, ont été choisies afin qu'elles soient reproductibles par tous.

Mots-clés : reforestation, débit, méthodologie, pluviométrie, courbe de tarage, forêt Amazonienne.

Recuperation of water spring and biodiversity from the reforestation and its environmental impact

Following and methodological improvement of the water flow measurement of an Ecuadorian stream in the frame of the reforestation project in the Los Yapas Parc

Summary:

While deforestation all around the world is continuing, it's even increasing in Equator. The Equatorial botanical Park Los Yapas, situated on the boundary with the Amazonian forest, has a 25 ha reforestation project on a land previously deforested and used as pastures. The main goal of this scientific project is to restore biodiversity and to show the local population, the benefits to be gained from such a restoration. In 2013, Anna LI-MARCHETTI conducted a project about the impact of reforestation on biodiversity, to check if more water springs can be obtained thanks to the reforestation. This last point used the measurement of the "Los Yapas" stream water flow, but due to constraints, it didn't produce enough results. This current report focuses on the improvements and the proposition of new methodologies. A new follow up of precipitations and some improved methodologies in order to measure the Los Yapas stream water flow, are proposed. The knowledge of the Los Yapas watershed has also been improved. These changes have been done respecting a tight budget, and methodologies, as simple as possible, have been selected so as to be reproduced by everyone.

Key-words: reforestation, water flow, methodology, precipitation, tarage curve, Amazonian forest.