

UNIVERSITE
MONTPELLIER II
Ecole Doctorale Sciences de la
Terre et de l'Eau

INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DEVELOPPEMENT
Département Milieux et
Environnement
UR GREAT ICE

***Bilan hydrique d'un système lacustre de haute montagne :
le bassin Paron (Cordillère Blanche - Pérou)***

Wilson SUAREZ

*Mémoire de DEA en Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental
Sous la direction de Pierre Chevallier*

Soutenu le 07 juillet 2003 devant un jury composé de :

**Michel DESBORDES
Alain DELACOURT
Pierre CHEVALLIER
Anne COUDRAIN**

SERVICIO NACIONAL DE
METERELOGIA E
HIDROLOGIA DEL PERU
(SENAMHI)
Dirección de Hidrología

INSTITUTO NACIONAL DE
RECURSOS NATURALES
DEL PERU (INRENA)
Unidad de Glaciología y
Recursos Hídricos

REMERCIEMENTS

Mon stage s'est déroulé dans d'excellentes conditions, matérielles bien sûr, mais surtout humaines. Je le dois à de nombreuses personnes dont seules quelques unes seront nommées dans cette page ; que les autres me pardonnent.

Je tiens à remercier sincèrement Pierre Chevallier, mon directeur de stage, pour la grande disponibilité dont il a fait preuve tout au long de ce travail et pour la patience qu'il montre pour travailler avec des étudiants étrangers.

Je remercie également Bernard Pouyaud par son aide depuis le Pérou, et Pierre Ribstein pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

A tout le personnel de GREAT ICE qui a été très gentil avec moi pendant mon stage : Eric Cadier, Alain Gioda, Yann L'Hôte, Philippe Garreta, Vincent Favier et Christine Legrand.

A Paulina Lopez pour ses conseils en télédétection et à mes différents collègues du D.E.A qui m'ont aidé à connaître leur pays : Marie Bourqui, Olivier Laarman et Alexandra Lequien.

Bilan hydrique d'un système lacustre de haute montagne : le bassin Paron (Cordillère Blanche – Pérou)

1. INTRODUCTION.....	1
2. CONTEXTE ET OBJECTIF.....	3
2.1. Objectif de l'étude	3
2.2. Problématique et intérêt de l'étude	3
2.3. Zone d'étude	6
2.3.1. Situation géographique	6
2.3.2. Situation géologique	6
2.3.3. Situation climatique	6
2.4. Caractéristiques hydrologiques des bassins	7
2.4.1. Précipitation	7
2.4.2. Spécificités des bassins glaciaires	8
2.4.3. Hydrologie des versants non glaciaires	10
2.5. Historique du Lac Paron	10
3. ELEMENTS DE TELEDECTION ET SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE.....	13
3.1 Eléments de télédétection	13
3.1.1 Le satellite SPOT	14
3.1.2. ERDAS	16
3.2. Classification et reconnaissance des surfaces glaciaires	16
3.2.1. Géoréférencement	16
3.2.2. Classification	18
3.3. SIG et MNT du bassin Paron	19
3.3.1. SIG	19
3.3.2. MNT	20
3.3.3. Méthode	20
3.3.4. Courbes hypsométriques	21
3.4. Résultats	22
4 . ELEMENTS DU SYSTEME ET DONNEES DISPONIBLES.....	24
4.1. Hypothèses de travail	24
4.2. Les données disponibles	24
4.2.1. Choix du pas de temps de travail	24
4.2.2. Bassin du Lac Arteson	25
4.2.3. Bassin du lac Paron	25
4.2.4. Problèmes de contrôle des vannes du Lac Paron	26
4.2.5. Régionalisation des précipitations	30
5. METHODE DU BILAN DE MASSE.....	31
5.1. Bilan du système lacustre	32
5.2. Hypothèses à considérer	33
5.2.1. Ligne d'équilibre des glaciers	33
5.2.2. Fonte de la glace	33
5.2.3. Evaporation (Vev)	33

5.2.4. Infiltration (V_i)	34
5.2.5. Pluie sur les lacs (V_p)	34
5.2.6. Apports souterrains (V_{ecs})	34
5.2.7. Ruissellement des versants non glaciaires	34
5.3. Méthodologie de calcul du bilan	36
5.3.1. Fonction de production d'écoulement non glaciaire	36
5.3.2. Système hydrologique du bassin du lac Arteson	37
5.3.3. Fonction de production des glaciers	38
5.3.4. Système hydraulique du bassin du lac Paron.	39
5.3.5. Evaporation	40
5.3.6. Critère utilisé pour l'ajustement du modèle	41
6. RESULTATS ET DISCUSSIONS	42
6.1 Résultats	42
6.1.1. Lac Paron	42
6.1.2. Lac Arteson	46
6.2. Discussion	49
6.2.1. Bilan avec des données insuffisantes	49
6.3. Télédétection	50
7. CONCLUSIONS	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53

1. INTRODUCTION

Géographiquement, le Pérou se trouve dans la région intertropicale de la planète. Aussi, du fait du réchauffement climatique notable depuis le siècle dernier, l'évaluation des ressources hydriques, spécialement d'origine glaciaire, est un enjeu majeur.

Une proportion très grande des glaciers tropicaux du monde est dans la Cordillère Blanche. Cette formation géologique qui se trouve à environ 400 km au nord de la capitale Lima, a une grande importance pour l'activité économique du Pays (figure 01). En effet, le Rio Santa qui longe la Cordillère Blanche sur son versant ouest est impliqué dans les principaux projets d'irrigation du nord du pays et alimente la centrale hydroélectrique de « Huayanca » qui fournit l'énergie des principales villes et villages du nord du pays.

Ce fleuve, le « Rio Santa » a un régime qui dépend de la période de l'année. Pendant la saison humide (décembre, janvier, février, mars et avril), on constate un apport principal de pluie, mais au cours des autres mois qui correspondent aux saisons sèche et de transition, l'apport principal vient des écoulements de fonte des glaciers.

Dans la Cordillère Blanche, on note des séries de vallées transversales (figure 02) qui, sous l'action du recul des glaciers ont laissé des formations morainiques qui offrent des conditions optimales pour la formation de petits lacs alimentés par les précipitations et la fonte des glaciers. Ces lacs morainiques sont d'importantes ressources d'alimentation en eau pendant la saison sèche. Parmi ces lacs, l'un d'entre eux revêt une importance particulière : il s'agit du Lac Paron qui se trouve dans une vallée caractérisé par ses nombreux apports glaciaires et par un autre lac plus à l'amont. Au cours des années 80, le lac Paron fut l'objet de travaux afin de mieux contrôler son niveau pour éviter des problèmes de débordement liés à la chute possible de glaciers suspendus ; actuellement l'aménagement est sous le contrôle de l'entreprise de production énergétique qui utilise l'eau pendant la saison sèche pour alimenter la centrale hydroélectrique de Huayanca.

Pour étudier ce système, nous disposons des données de l'unité de recherche en glaciologie de l'Institut National des Ressources Naturelles du Pérou (INRENA), du Service National de Météorologie et Hydrologie du Pérou (SENAMHI), de l'entreprise de production électrique (EGENOR) et de l'unité GREATICE de l'IRD.

En partant de l'hypothèse que tous les glaciers ont un comportement similaire dans tout le bassin de Paron et avec la connaissance de tous des facteurs qui interviennent, on peut déterminer une première approximation du comportement hydrique de ce lac, pour savoir quels sont les apports d'origine glaciaire et pouvoir évaluer à long terme l'évolution des ressources hydriques dans le bassin du fleuve Santa .

Dans les deux premiers chapitres de ce mémoire, on détaillera les caractéristiques générales de la zone d'étude, les travaux effectués pour l'élaboration d'un système d'information géographique (SIG) et les critères utilisés pour la délimitation de la surface glaciaire.

Le troisième chapitre décrit les données disponibles pour l'étude de ce bassin versant et indique les principaux problèmes rencontrés.

Les trois derniers chapitres présentent le travail d'évaluation du bilan hydrologique des deux lacs du bassin Paron sous diverses hypothèses.

2. CONTEXTE ET OBJECTIF

2.1. Objectif de l'étude

Dans le cadre de ce travail, nous souhaitons effectuer un bilan hydrologique des deux lacs du bassin Paron et analyser le comportement et la relation existant entre eux. Afin d'analyser les principales variables qui interviennent dans ce bilan, on a construit un système d'information géographique (« SIG ») en utilisant les logiciels ERDAS et ARC VIEW et en élaborant une modélisation avec l'utilisation du logiciel EXCEL .

Le but de ce travail est de voir quels sont les meilleurs paramètres hydrologiques qui décrivent le comportement de cette catégorie de bassins versants de haute montagne tropicale .Cela constitue également le point de départ d'une analyse plus vaste du comportement général des petits bassins versants et lacs du bassin versant du Rio Santa.

2.2. Problématique et intérêt de l'étude

Lorsque les conditions climatiques sont favorables (pluies suffisantes et températures basses), le volume des glaciers augmente. Mais, avec une pluie déficitaire et une augmentation de la température moyenne annuelle les glaciers reculent . Avec l'amorce d'un réchauffement global, on observe actuellement ce recul dans le monde entier (Favier, 2001).

Les glaciers tropicaux sont les plus affectés en raison d'une ablation constante qui se manifeste pendant toute l'année : ils sont très sensibles aux effets de la variabilité climatique qui est à l'origine des fluctuations de leur bilan de masse (Ribstein et al., 1995).

De nombreux villages au Pérou utilisent l'eau de la fonte des glaciers comme à Lima, la capitale, ou Huaraz, au centre de la Cordillère Blanche avec une population de plus de 60 000 habitants.

Dans le bassin du Rio Santa, avec l'augmentation de la demande de ressources en eau pour l'utilisation agricole et la production électrique, apparaissent de nombreux problèmes de gestion. Mais comme les principaux apports proviennent de la fonte des glaciers, il est nécessaire de s'intéresser au comportement des petits bassins versants dans les vallées transversales.

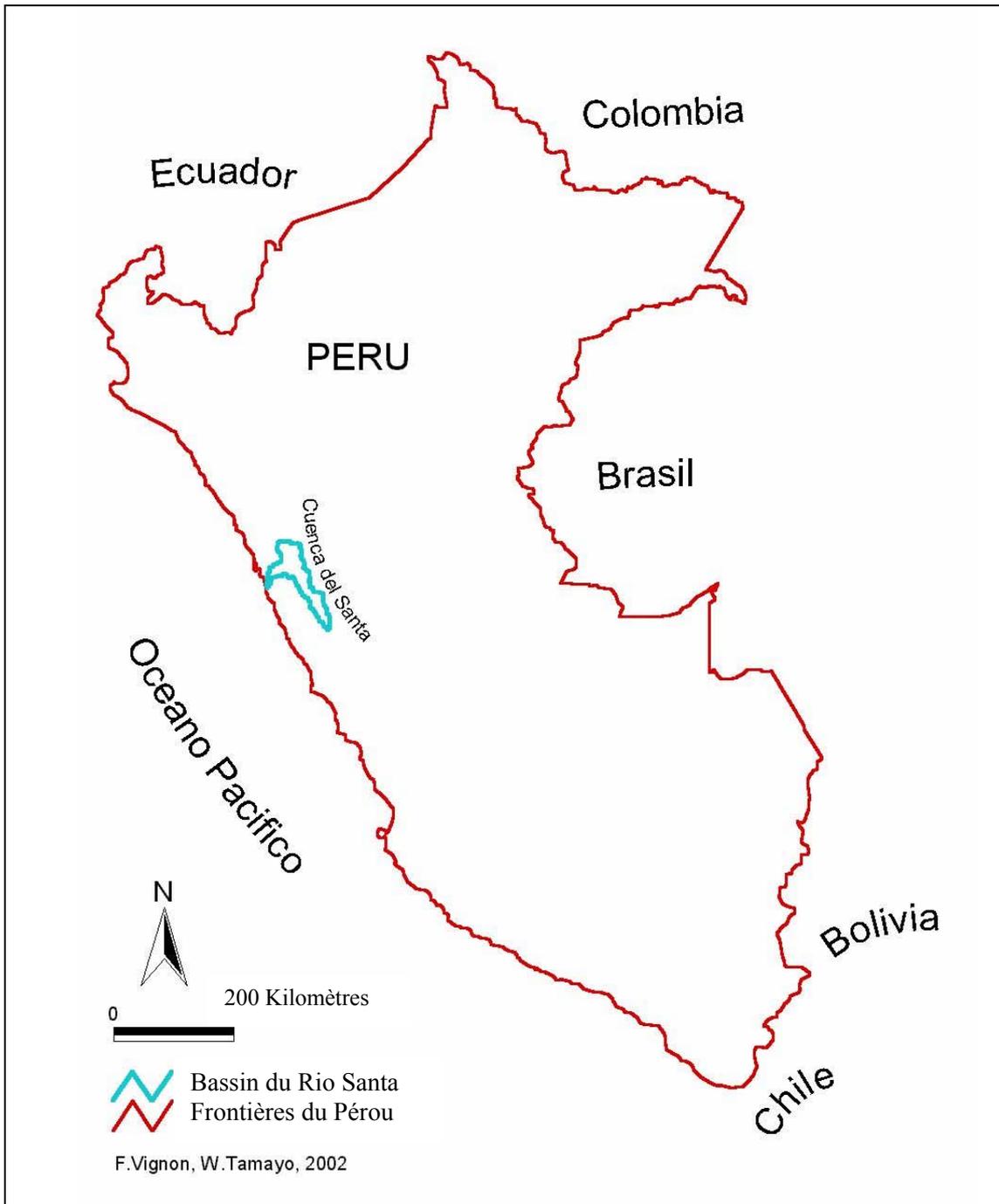


Figure 1 : Localisation du Bassin versant du Rio Santa au Pérou.

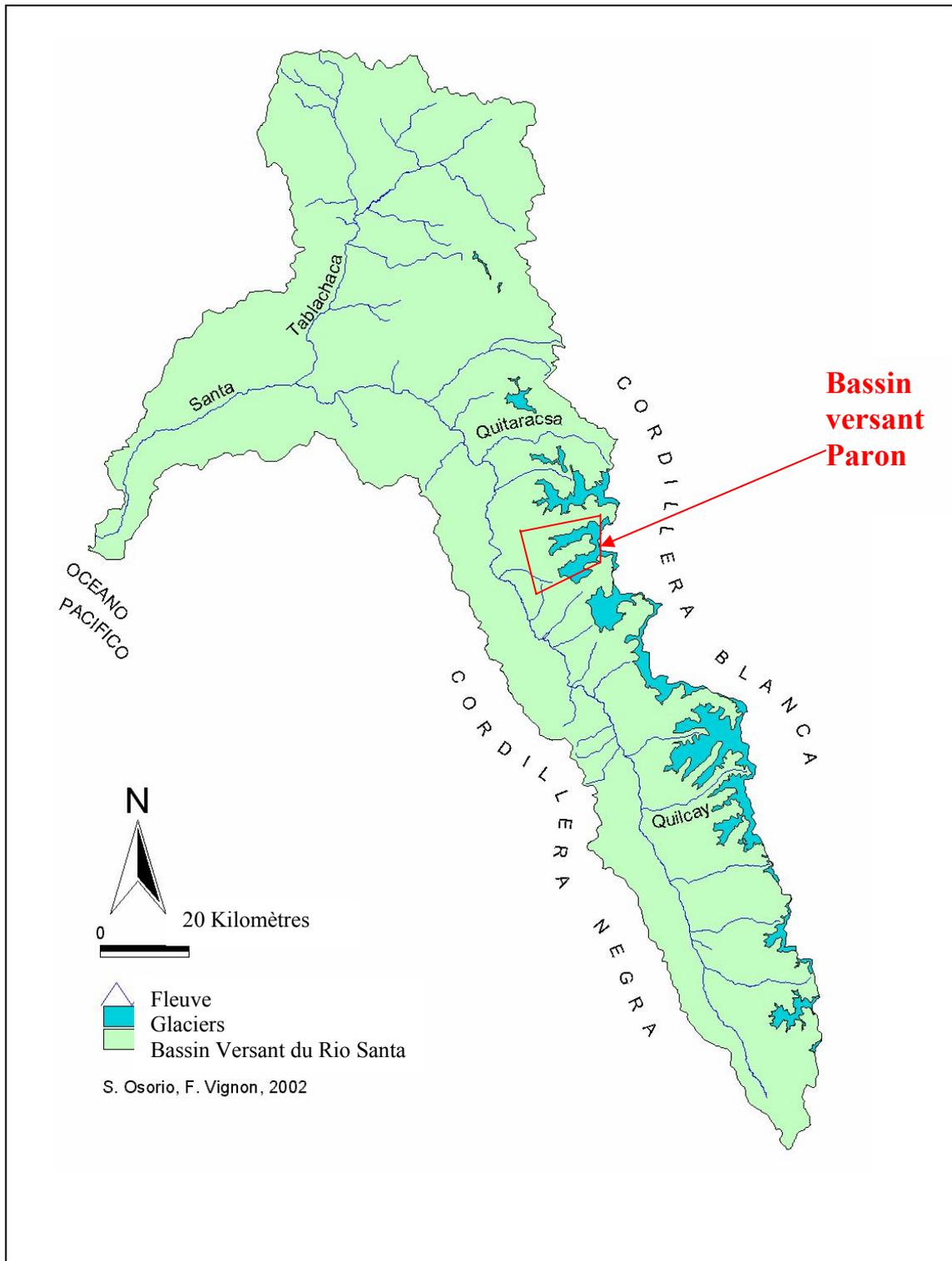


Figure 2 : Position du Bassin Paron dans le Bassin du Rio Santa (Pérou)

2..3 Zone d'étude

2.3.1. Situation géographique

Le bassin du Rio Santa se trouve dans le nord du Pérou (figure 1). Avec une surface de 11 910 km² (Vignon, 2002), il est le plus grand bassin versant de la cordillère occidentale du Pérou.

Le bassin du Rio Santa est alimenté par la Cordillère Blanche qui occupe 631 km² de surface glaciaire, soit 5,3% de surface de tout le bassin, (évaluation sur les documents de 1968 selon Vignon, 2002).

Dans ce grand bassin versant, il y a une série de petits bassins d'origine glaciaire qui occupent les vallées transversales de la Cordillère Blanche. Parmi eux se trouve le bassin de Paron (figure 2) avec une position de 8° 59' de latitude sud et 77° 41' de longitude ouest .

C'est un bassin versant de 44,26 km² où l'on trouve deux lacs de volume significatifs. « Arteson » est le premier lac avec une surface proche de 864 000 m² qui varie peu au cours de l'année. La superficie du bassin versant est de 8,39 km² où plus de 74% est constitué de glaciers. Le second lac, « Paron », est aussi d'origine glaciaire, mais sa surface varie selon les besoins de la centrale électrique de Huayanca qui utilise l'eau. Le lac Paron est alimenté par un sous-bassin versant de 35,87 km² dont 34% de surface glaciaire et par les débordements du lac Arteson.

Ces deux petits lacs se trouvent tous deux à plus de 4000 mètres d'altitude, justifiant ainsi leur qualificatif de lacs de haute montagne.

2.3.2. Situation géologique

Le bassin versant Paron se trouve dans la Cordillère Blanche, constituée principalement d'un batholite de formation ignée. La majeure partie des hautes montagnes de ce bassin est constituée de roches ignées de type granodiorite et granite. A l'aval du bassin on trouve des matériaux fluvioglaciaires colluviaux et alluviaux (moraines, cônes d'éboulis et déjections). On note aussi des terrasses perchées d'origine sédimentaire.

2.3.3. Situation climatique

Il est important de bien comprendre le comportement climatique du bassin parce que les paramètres hydrologiques en dépendent étroitement.

- **La zone intertropicale : définition**

La zone intertropicale se caractérise par des concepts géographique et climatique. Géographiquement, cette zone se trouve délimitée par deux lignes imaginaires qui

sont équidistantes de l'équateur (figure 3) : au nord, le Tropique du Cancer ($23^{\circ}27'N$) et au sud le tropique de Capricorne ($23^{\circ}27'S$)..

Climatiquement, la zone intertropicale se trouve dans une zone où l'amplitude thermique annuelle ΔT_a reste inférieure à l' amplitude diurne ΔT_d . C'est une ceinture de convergence qui entoure la terre sur l'équateur et présente une variabilité annuelle de type stationnelle et maritime - terrestre.

2.4. Caractéristiques hydrologiques des bassins

2.4.1. Précipitation

La zone présente en général deux grandes saisons en fonction de la précipitation, la première est la saison sèche durant les mois de juin, juillet, août et septembre, la seconde est la saison humide pendant les mois de décembre, janvier, février, mars et la première moitié d'avril. Les autres mois constituent deux saisons de transition dont les caractéristiques varient selon les années..

La saison humide correspond à la position de la zone de convergence intertropicale (« Inter Tropical Convergence Zone » - ITCZ), sur laquelle converge les alizés chargés d'humidité (figure 3).

- **Zone de Convergence Intertropicale**

L'ITCZ est un système météorologique qui doit son origine aux masses d'air chaudes et humides des zones tropicales. Celles-ci se déplacent sous l'influence de l'oscillation de la position des alizés liée à la rotation de la terre provoquant des concentrations d'humidité dans des nuages convectifs et de fortes précipitations (figure 3).

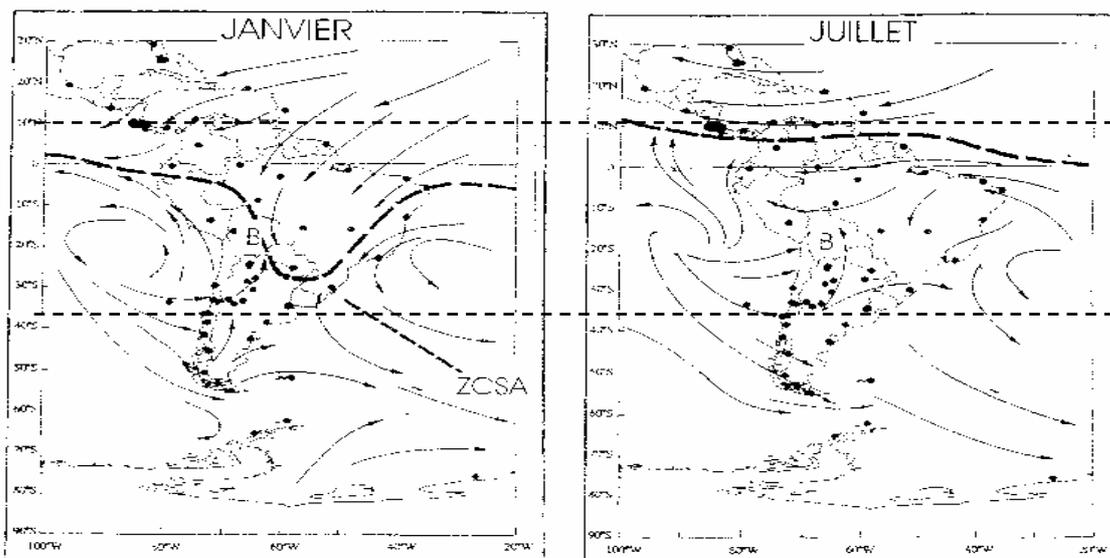


Figure 3 : Les lignes pointillées indiquent les frontières de la zone intertropicale. Des flèches donnent les directions du vent en surface. Une ligne en pointillés épais donne la position de la zone de convergence intertropicale (ITCZ) en Amérique du Sud, au cours de l'été austral (saison humide) et de l'hiver austral (saison sèche) (Vignon, 2002).

En montagne, les pluies de la saison humide sont influencées par les caractéristiques orographiques, les nuages de l'ITCZ se condensant sur la Cordillère Blanche (figure 4).

Il est également important d'indiquer que ces régimes pluviométriques sont influencés par des phénomènes climatiques spécifiques, comme « El Niño ». Cet événement climatique qui se reproduit périodiquement, provoque une altération dans le régime pluviométrique de la région.

Un autre facteur très important influençant le régime pluviométrique est l'altitude. En effet, l'ensemble des données recueillies grâce aux pluviomètres du Service Météorologique du Pérou (SENAMHI) et de l'Unité de Glaciologie du Pérou (INRENA) témoigne d'un tel comportement dans le bassin du Rio Santa et dans les autres petits bassins versants proches du bassin Paron.

La précipitation sur le lac Paron est mesurée par un pluviomètre journalier que l'on peut utiliser pour analyser le comportement à un pas de temps décadaire (figure 5).

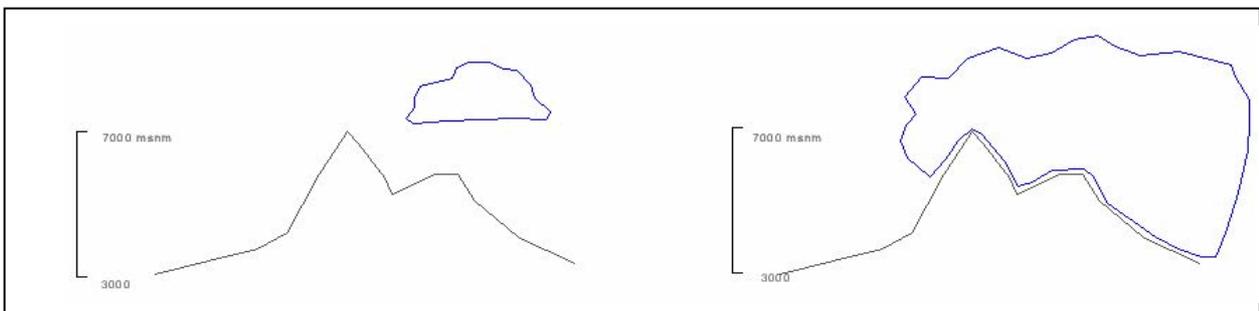


Figure 4 : Représentation du comportement des nuages pendant la saison sèche (gauche) et la saison humide (droite)

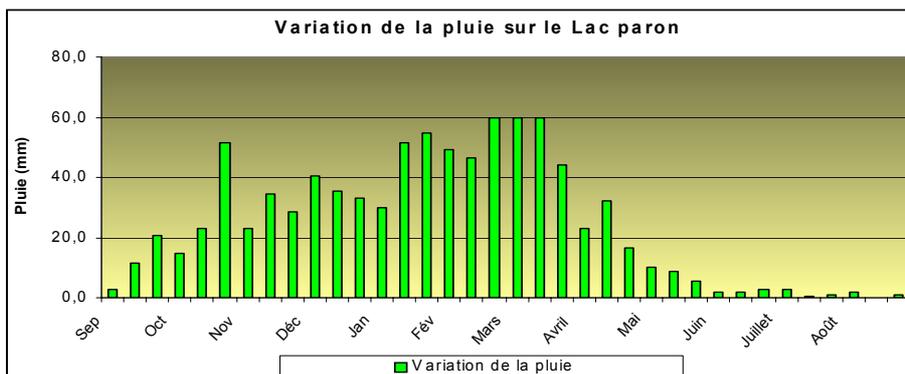


Figure 5 : Précipitation moyenne des 7 dernières années sur le lac Paron au pas de temps décadaire et pour l'année hydrologique de septembre à août

2.4.2. Spécificités des bassins glaciaires

Les régimes hydrologiques des bassins versants glaciaires sont fortement influencés par la fonte journalière. A la différence d'un régime de type fluvial, les précipitations et les débits sont anticorrélés : en effet la nébulosité limite les radiations solaires et les précipitations sous forme de neige limitent la fonte (albédo élevé de la neige fraîche). De plus, les précipitations ne donnent pas lieu à un ruissellement immédiat,

puisqu'elles sont soumises à une étape de fonte. Les précipitations sont donc modératrices des débits.

Dans les régions tropicales comme la Cordillère Blanche, l'accumulation se produit pendant la saison humide, mais l'ablation se produit toute l'année. Cette dernière se présente sous deux formes : fusion de la glace en eau et sublimation de la glace directement en vapeur (Vignon 2002).

Description des glaciers de la zone d'étude

Les glaciers de la Cordillère Blanche sont de type « glaciers de montagne » ou « petits glaciers de vallée » (Vignon, 2002).

Selon sa morphologie le glacier peut se séparer en deux grandes zones. La première est la **zone d'accumulation** où pendant toute l'année, le rapport de masse (apport et usure) est positif. Cette zone est la plus haute. Dans la zone d'accumulation, l'albédo est généralement compris entre 0,5 et 0,9 et la densité superficielle de la neige reste faible (entre 0,1 et 0,2).

La zone aval s'appelle **zone d'ablation** où le bilan de masse est négatif, Ici l'albédo est entre 0,5 et 0,3 avec une densité superficielle qui est souvent celle de la glace (0,9).

Les deux zones sont séparées par la ligne d'équilibre qui se définit comme la ligne où le glacier compense l'ablation et l'accumulation pendant toute l'année (bilan nul) ; son altitude est fonction des conditions climatiques de l'année. Dans les régions tropicales, elle se situe généralement entre 5000 mètres (Kaser, 2001) et 5200 mètres. Sur la figure 6, on peut voir la morphologie d'un glacier. On doit noter que la position de la ligne d'équilibre est fonction du climat : lors des événements climatiques exceptionnels comme « El Niño », sa position peut varier significativement.

Le front du glacier se trouve dans la zone d'ablation du glacier, c'est la partie terminale du glacier vers l'aval. En conséquence la dynamique des fronts glaciaires peut être très différente d'un glacier à l'autre (Francou, Ribstein & Pouyaud, 1997).

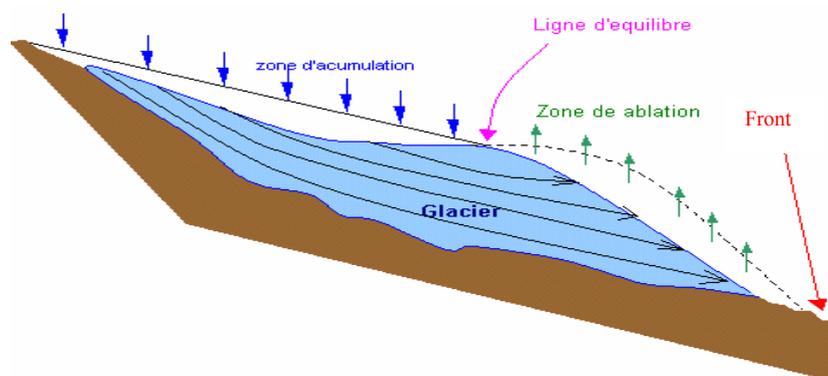


Figure 6 : Schème de un glacier typique de la zone d'étude

2.4.3. Hydrologie des versants non glaciaires

Les surfaces non glaciaires du bassin versant étudié sont couvertes de manière équivalente par des zones de « Puna » (végétation basse d'altitude) ou par des dépôts morainiques (« Janca »). Les zones de Puna ont des caractéristiques très spécifiques avec une présence permanente d'humidité ; elles s'étagent entre 3800 et 4800 mètres. Le paysage caractéristique de cette zone présente des vallées glaciaires en forme de « U », des petits lacs, des replats. Elles sont limitées par les étendues glaciaires et morainiques (« Janca ») au dessus de 5000 mètres d'altitude.

Dans les deux types de surfaces, le concept Hortonien de ruissellement n'est pas applicable parce que la vitesse d'infiltration est très rapide (sols morainiques). Des études hydrologiques réalisées sur des couvertures semblables en Equateur ont donné des réponses fortes pour l'infiltration, et par différence un coefficient de ruissellement faible (Favier, 2001).

Les surfaces de « Janca » sont constituées de terrains morainiques, qui agissent comme des barrages et favorisent la formation de lacs. Il est donc important de connaître le comportement hydrique de ce type de sol ; et en particulier de se poser la question de la possibilité de pertes en eau dans la moraine.

2.5. Historique du Lac Paron

Avant de poursuivre l'étude du bassin versant Paron, il est nécessaire de donner quelques précisions historiques sur le lac principal de la vallée :

- Fonctionnement « naturel » jusqu'à la fin des années 60.
- Au début de l'année 1968, ont commencé des travaux : un canal déversoir (cote 4198 m) , puis un siphon métallique ; ils ne fonctionneront jamais ni l'un ni l'autre.
- Au début de l'année 1970, un séisme a occasionné la chute d'un bloc de glace dans la vallée voisine. « Le morceau tombe sur une paroi de 500 mètres de haut, Elle se charge des débris arrachés à la face rocheuse et à la moraine du glacier au pied de la paroi et dévale à une vitesse de 280 km/h les 3,3 km de dénivelé et les 14 km qui le séparent de la ville de Yungay, occasionnant une avalanche d'ampleur colossale sur cette ville » (Francou, 1993), causant la mort de près de 20000 personnes. A cause de cette catastrophe, le gouvernement a commencé à modifier sa politique sur les lacs et glaciers de haute montagne.
- Pour éviter une tragédie similaire à celle de Yungay, dès 1970 un tunnel de 1157 mètres a été percé en rive droite du Lac Paron dans la granodiorite du batholite afin de contrôler le niveau du lac en cas d'éboulement ; le tunnel a été achevé à la fin de l'année de 1972.
- En 1980, l'Entreprise de Production Electrique du Pérou (ELECTROPERU) qui contrôle l'eau du lac Paron pour alimenter l'usine de Huayanca a demandé la révision des travaux (en deux étapes) à la compagnie « S&Z Consultores

Asociados ». La première étape consiste à repercer le tunnel. La seconde étape vise à la perforation de 2 forages de 0.5 mètres de diamètre jusqu'au lac, depuis une chambre de sondage de grande dimension forée au fond du tunnel. Ainsi, une connexion provisoire permet une première vidange du lac à une cote d'environ 50 mètres inférieure au niveau naturel (4200 m).

- Le travail commence en 1983. La vidange commence début 1984 mais est vite interrompue suite à un éboulement dans le tunnel. Les travaux de réparation du tunnel se sont réalisés d'octobre à décembre.
- Une nouvelle vidange est entreprise en février 1985, après une inspection qui montre le mauvais état et le mauvais fonctionnement des vannes qui ne s'ouvrent qu'à la force hydraulique (et encore difficilement à condition de procéder lentement car le groupe hydraulique chauffe) et pas manuellement (dans conditions assez dantesques).
- Le 22 septembre 1986 la vidange est terminée (niveau le plus bas espéré) à la cote 4154.238 mètres. La descente du lac a été suivie par un dispositif complexe de balises et de piézomètres sur la digue naturelle, qui s'affaissera de plus de 1 mètre en certains endroits. Une chose importante est que après 10 m de baisse (cote 4190 mètres) la plupart des infiltrations du lac vers l'aval ont disparu ; ceci montre qu'il n'y avait pas de glace dans la digue naturelle .
- Fin 1987, la compagnie « S&Z » rédige le document de projet pour une troisième phase de construction « hors de l'eau » de la prise d'eau définitive. Elle ne sera entreprise qu'en 1990 pour s'achever en 1991. Les caractéristiques de l'installation définitive sont : 4185 m pour l'altitude maximale du lac, avec possibilité « exceptionnelle » d'aller jusqu'à à 4190 mètres ; prise d'eau à 4155 mètres ; volume « mort » de 14 Mm³.
- Les travaux sont conduits de 1990 à fin 1991 où se fait la réception de l'ouvrage. Après une phase d'essais début 1992, avec remplissage de la retenue alternant avec quelques lâchures, une véritable gestion avec soutien important des étiages commence en 1992.
- Aujourd'hui on note des problèmes avec les vannes : lorsque les indicateurs des vannes indiquent une fermeture totale, on observe dans la réalité des écoulements dans le tunnel.

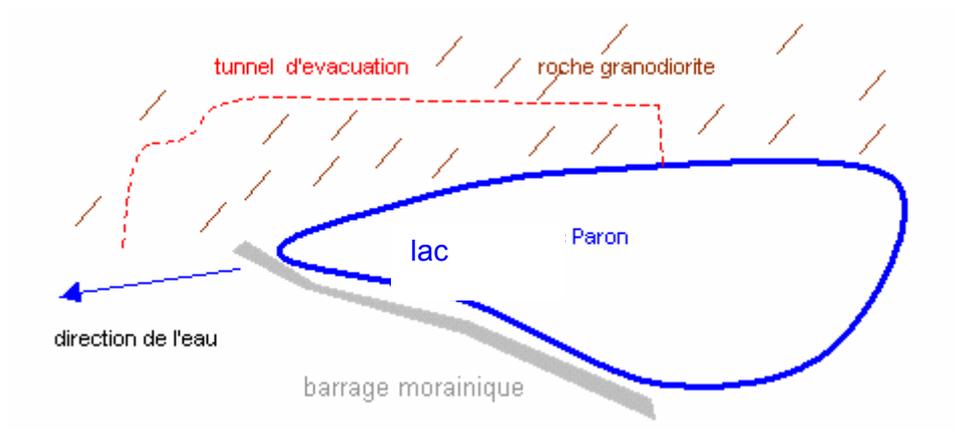


Figure 7 : Graphique de l'axe du tunnel d'évacuation de la lagune Paron

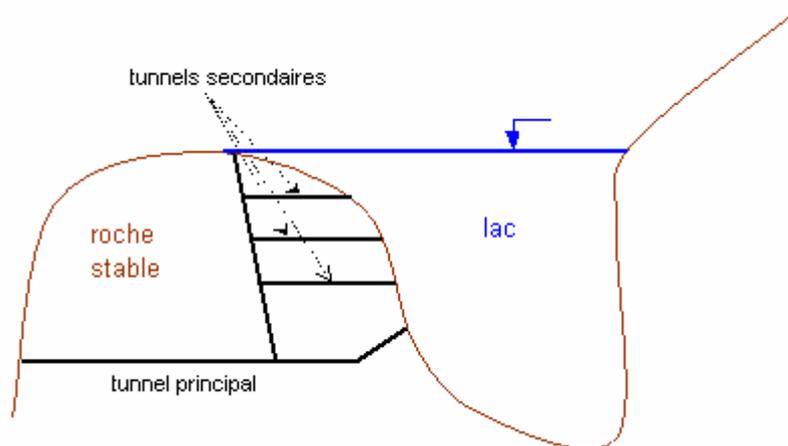


Figure 8 : Tunnels d'évacuations secondaires et principal

3. ELEMENTS DE TELEDETECTION ET SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Les images provenant des satellites sont un outil très important pour décrire des zones d'étude difficiles d'accès, par exemple à cause de la topographie ; elles permettent aussi de faire des observations avant et après un événement physique ou climatique sur la surface de la terre .

Dans ce travail, à cause des limitations liées à la configuration du terrain, il n'est pas possible de faire un relevé complet de la topographie. C'est pour cela que nous avons utilisé l'imagerie satellitale afin de déterminer des paramètres aussi importants que la surface des bassins versants et la surface couverte par les glaciers. L'utilisation ultérieure d'un SIG permet de déterminer l'hypsométrie du bassin Paron et certains autres paramètres géographiques de référence.

Pour simplifier, on utilisera dans la suite de ce travail les expressions suivantes :
-Bassin Paron pour le bassin versant lacustre qui est constitué par l'ensemble du bassin versant des lacs Paron et Arteson.
-Bassin du lac Arteson pour le sous bassin versant du lac Arteson .
-Bassin du lac Paron pour le sous bassin versant du bassin Paron excluant le bassin du lac Arteson .

Avant de détailler les travaux de télédétection sur ces sites, il est nécessaire de donner quelques précisions sur des concepts basiques de télédétection et sur les outils utilisés (logiciels).

3.1 Eléments de télédétection

La télédétection est la technique qui permet d'obtenir des informations à distance sur des objets qui sont à la surface de la terre. Le principe de base de cette approche passe par la connaissance de la réponse spectrale des objets étudiés ; c'est-à-dire des longueurs d'onde émises dans le spectre électromagnétique (figure 9) : En effet, tous les objets sur la terre émettent ou réfléchissent l'énergie électromagnétique, (HYDROLOGIE SPATIALISEE OUTILS & APPLICATIONS, 2002), mais tout bon corps émetteur, n'est pas forcément un bon réflecteur (Chuviéco , 1996).

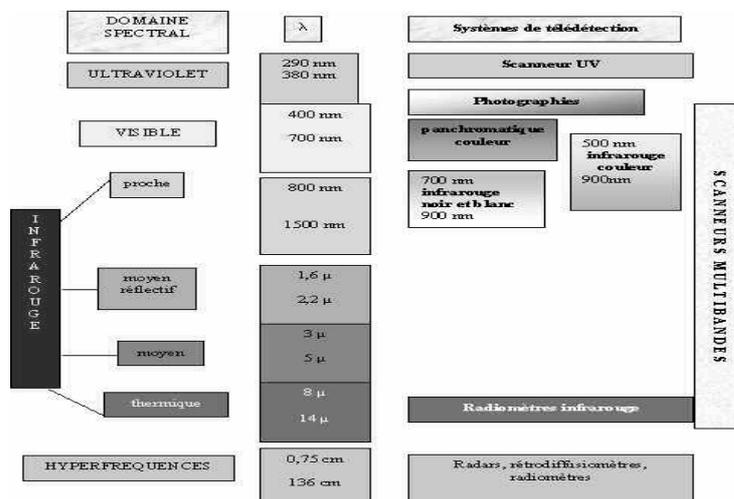


Figure 9 : le spectre électromagnétique (pris Page Web INRA)

La neige présente des limitations dans l'infrarouge thermique parce que la température, la taille des cristaux et le contenu en eau liquide affectent la mesure de la température radiative.

En général les facteurs les plus importants qui caractérisent la neige sont la taille des grains, l'épaisseur et la densité de la couche, ainsi que la quantité d'impuretés. Les glaciers par comparaison avec la neige ont une réflexion plus faible, car ils ne sont pas de bons émetteurs. Sur la figure 10, on peut voir la relation entre la réflectivité et la longueur d'onde.

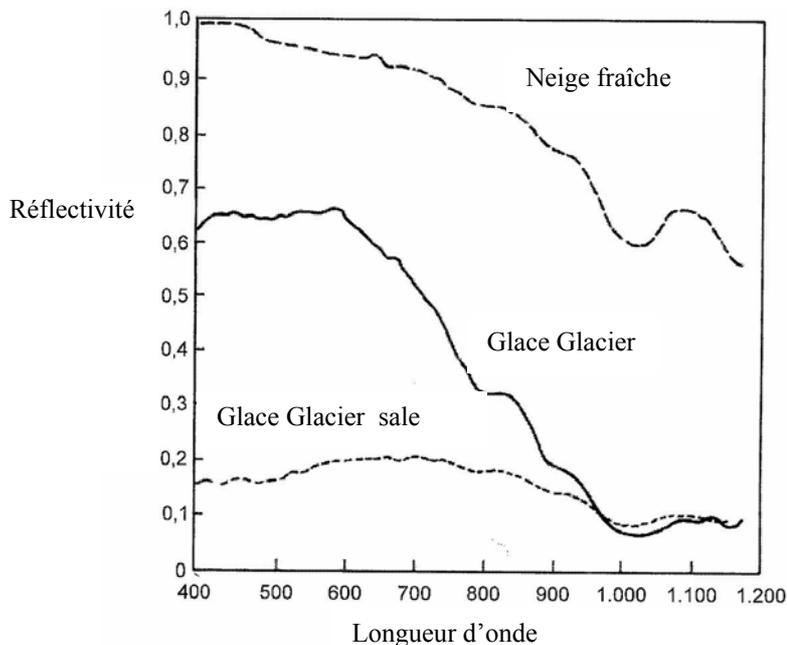


Figure 10 : Réflectivité caractéristique pour divers types de neige (Chuvienco, 1996)).

Les capteurs embarqués dans les satellites peuvent mesurer l'énergie (dans le spectre électromagnétique) qui arrive de la surface terrestre. Dans le cas des glaciers qui sont des sources naturelles, les observations les plus facilement accessibles proviennent des satellites passifs. Dans cette catégorie de satellites, on trouve en particulier les satellites européens SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre).

L'étape suivante importante consiste à interpréter l'information contenue dans les images et il existe actuellement pour le faire de nombreux logiciels (par exemple ERDAS).

3.1.1 Le satellite SPOT

Ce satellite a été construit par le CNES français avec la collaboration de la Belgique et de la Suède. Cette famille de satellites utilise deux ensembles d'exploration par barrettes de détecteurs que l'on appelle HRV (Haute Résolution Visible). Ces

ensembles permettent de voir des images dans deux modes : panchromatique et multispectral (vert, rouge et proche infrarouge), avec une résolution respectivement de 10 et de 20 mètres par pixel. Les images couvrent des surfaces de 60 km de côté, pour lequel ces ensembles contiennent 3000 détecteurs en mode multispectral et 6000 en mode panchromatique. Le tableau 1 présente les principales caractéristiques de cette famille de satellites.

Satellite	Instrument	Bandes Spectrales	Résolution Fauchée	Type de visées	Enregistreur de bord	Orbite/Altitude répétitivité	Lancement
SPOT 1, 2, 3	HRVx2	Pan: 0,51 - 0,73 mm mode XS:1, 2 et 3 V: 0,50 - 0,59 mm R: 0,61 - 0,68 mm PIR: 0,79 - 0,89 mm	80 m/ 185 km	Vertical ou latéral 27 degrés	oui	Polaire Héliosynch 822 km 26 jours si vertical 2 à 3 jours se prog.	SPOT 1: 1986 SPOT 2: 1990 SPOT 3: 1993

Tableau 1 : Caractéristiques des satellites SPOT (Maurel P, 1998)

Un grand avantage de ce satellite est aussi la capacité du HRV de varier le champ de vision, grâce à un dispositif mobile qui permet de faire des observations non verticales, en présentant des angles jusqu'à 27 degrés des deux côtés du nadir. Cela permet de voir la même scène depuis des orbites successives et, ainsi, de réduire la fréquence temporelle des images si nécessaire (de 26 jours à 2-3 jours selon la latitude). Cette propriété permet aussi de faire des images stéréoscopiques, améliorant considérablement les travaux topographiques.

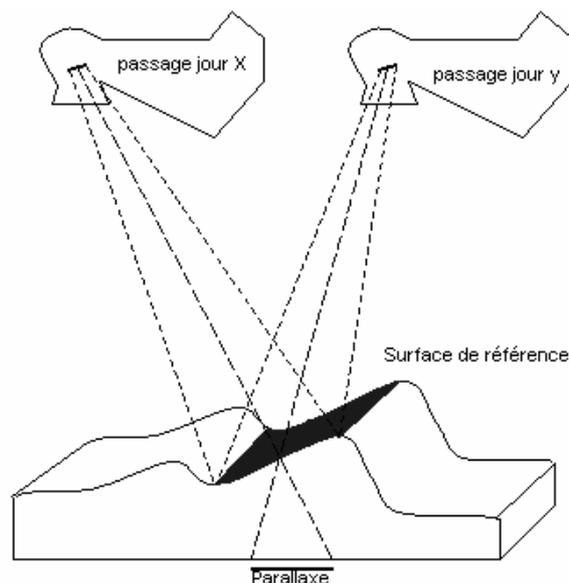


Figure 11 : Système d'acquisition d'images stéréoscopiques par le satellite SPOT.

3.1.2. ERDAS

ERDAS Imagine 8.3, disponible sous environnement Windows ou Unix, est un outil de traitement des images satellites, qui permet d'analyser, de générer des données, de visualiser, d'évaluer, et faire des représentations cartographiques à partir de l'information contenue dans l'image d'origine.

En hydrologie, l'utilisation de l'imagerie satellitale est très utile dans les zones d'accès difficile. Ce logiciel permet d'interpréter les images et de faire une classification des éléments physiques contenus dans les images selon leur réponse spectrale. Il utilise un algorithme pour transformer les réponses radiométriques en valeurs numériques facilitant l'interprétation.

3.2. Classification et reconnaissance des surfaces glaciaires

Pour des travaux de classification, il est très important de considérer le type d'image à utiliser. Dans le cas du bassin Paron, on a utilisé une image SPOT avec une résolution de 20 x 20 mètres par pixel . Une autre information importante est la date de l'image qui est choisie en fonction des objectifs du travail. Ici, l'objectif de la classification est de cartographier les surfaces glaciaires ; il est préférable de travailler sur une image de saison sèche, quand il n'y a pas de nuage et de pluie . La date de l'image est de juillet de 1990 où on peut voir la surface glaciaire sans aucune limitation.

La méthode utilisée s'appuie donc sur l'utilisation des images pendant la saison sèche au travers du logiciel ERDAS 8.3 et d'une carte topographique de la zone d'étude pour le géoréférencement (correction géographique) du bassin Paron et des autres petits bassins emboîtés. Pour la classification des surfaces glaciaires on a fait appel à la technique de la classification « supervisée ».

3.2.1. Géoréférencement

Les images SPOT sont fournies dans un format où elles ne sont pas recalées précisément dans l'espace géographique terrestre. La première étape consiste donc à déterminer des points fixes de calage (géoréférencement) en utilisant ERDAS et une carte topographique. Dans le cas d'étude, il s'agit de la carte élaborée par l'Institut géographique du Pérou (ING) à partir de photos aériennes de 1971 à une précision de 10 mètres, à une échelle de 1/100000, selon la projection universelle de Mercator (WGS 84) sur la grille UTM (4 kilomètres, zone 18.). Le calage de l'image a été opéré à partir de 173 points de référence qui ont été choisis principalement dans les montagnes.

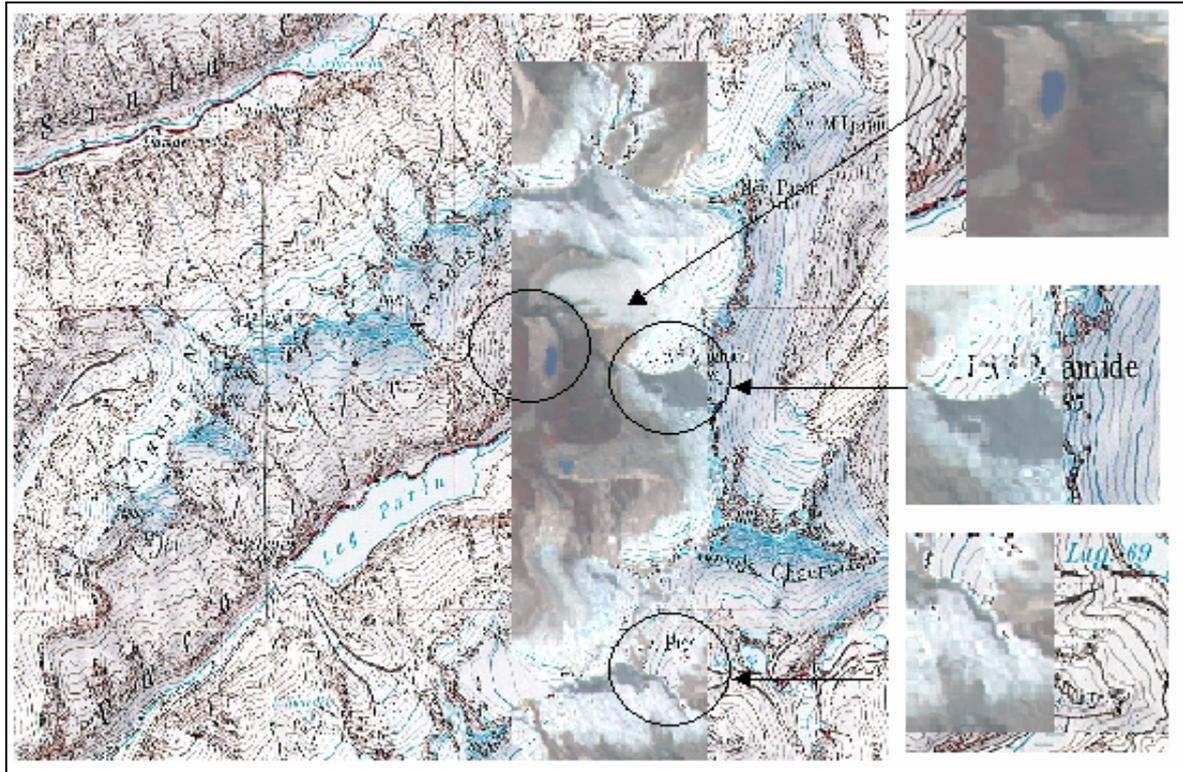


Figure 12 : Superposition de la carte topographique et de l'image Spot avec des zooms sur trois points spécifiques : a) le lac Arteson ; b) le Massif de la « Piramide » à l'est du lac Arteson ; c) le front d'un glacier du côté de Llanganuco.

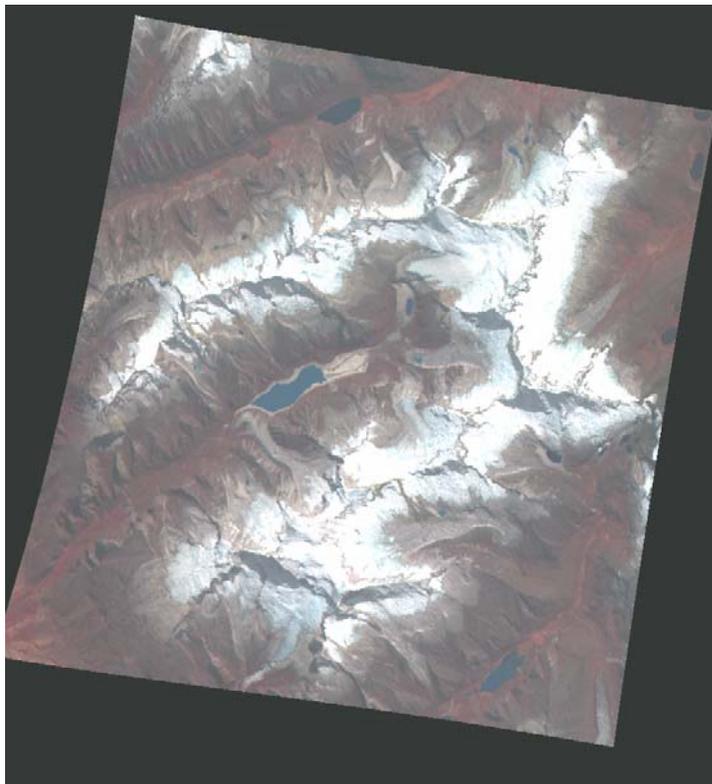


Figure 13 : Image SPOT (XS1, XS2 et XS3) du Bassin Paron à la suite du géoréférencement ; observer dans l'angle inférieur gauche la déformation de d'image à cause du faible nombre de points de contrôle à cet endroit.

La principale difficulté rencontrée dans le choix de points de référence à côté du lac Paron, est que la carte topographique date de l'année 1971 et l'image SPOT du mois de juillet 1990 ; en 1971 les opérations de vidange du lac n'avaient pas encore eu lieu, alors que l'image Spot fait suite à de telles opérations.

Sur la figure 12, on peut voir la carte topographique et avec des extraits de superposition de l'image du satellite sur le bassin du lac Arteson, et sur la figure 13, l'image complète du Bassin Paron à la suite du géoréférencement.

3.2.2. Classification

Il a été indiqué précédemment que la détermination d'un objet dans l'image est fonction de la réponse radiométrique (émission ou réflexion de l'énergie électromagnétique) et de la manière dont le capteur du satellite la perçoit. La classification du bassin Paron a été faite avec le logiciel ERDAS 8.3, qui utilise un algorithme propre pour remplacer les réponses radiométriques de l'image du satellite par un code numérique. Il est important d'indiquer que la réponse radiométrique d'un même élément peut varier sous l'influence de facteurs extérieurs : par exemple s'il y a de l'ombre ou si dans le pixel il y a d'autres éléments mélangés.

La classification supervisée donne 17 réponses électromagnétiques bien différenciées regroupées en 4 groupes spécifiques (tableau 2).

Groupes	Réponses Radiométriques
Glaciers	Partie basse des glaciers
	Partie intermédiaire des glaciers (I)
	Partie intermédiaire des glaciers (II)
	partie en bas des glaciers (front du glacier)
Ombres	Glacier (I)
	Glacier (II)
	Moraine
Eau libre	Lac Paron
	Lac Arteson
	Petites surfaces d'eau
Sols	7 réponses différentes

Tableau 2 : Réponses radiométriques des principales unités dans le Bassin Paron.

Dans la tableau 2, on donne les principales réponses radiométriques classées en 4 groupes selon la nature spectrale de l'objet. On note que pour les glaciers, il y a 6 réponses radiométriques distinctes (4 dans le groupe *glacier* et 2 dans le groupe *ombre*) qui sont fonction non seulement de la position de la glace sur le glacier au moment où le satellite a capté l'image, mais aussi de paramètres physiques de la glace : dans la zone la plus haute, il y a plus de neige, ce qui entraîne un albédo plus

grand et une densité plus faible, alors qu'à l'aval l'albédo est plus faible et la densité plus élevée. Le même phénomène affecte les parties ombragées sur le glacier à la différence près qu'il y a moins d'énergie réfléchie.

Après le processus de classification « supervisée » de l'image, il est nécessaire de faire des corrections tenant compte de la connaissance de la zone d'étude.

Sur la figure 14, on a représenté l'image du satellite en superposant la surface glaciaire déterminée par la classification.

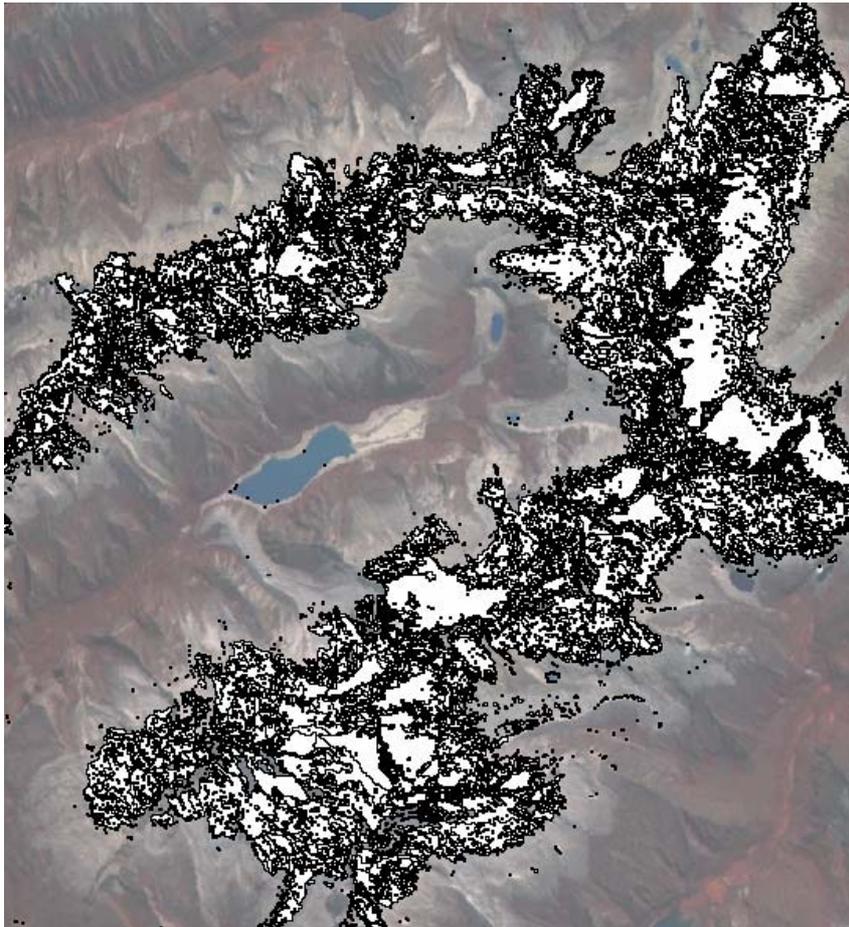


Figure 14 : Image SPOT (XS1, XS2 et XS3) du bassin Paron où on peut voir la correction graphique de la réponse radiométrique des surfaces glaciaires après la classification « supervisée ».

3.3. SIG et MNT du bassin Paron

3.3.1. SIG

Un système d'information géographique (SIG) est d'abord un système de gestion et de traitement d'informations structurées de façon à gérer et à représenter un « univers » donné. La spécificité du SIG est que cet univers appartient à l'espace

géographique : il permet la manipulation de données spatiales telles que la distribution de ressources naturelles (sols, eaux, végétation, etc.), la localisation d'infrastructures (routes, édifices, réseaux, etc.), les limites administratives et politiques. Dans notre cas, un SIG a été construit pour délimiter le bassin versant Paron et, avec l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT), délimiter les courbes hypsométriques et la surface de glacier qu'il y a entre les cotes de terrain.

De ce fait, l'architecture fonctionnelle de tout SIG assemble des bases de données graphiques et des bases de données thématiques. Ici, on utilisera seulement des données graphiques.

L'information spatiale, destinée à être visualisée dans l'espace, s'organise en couches (ou couvertures) de même nature thématique (le réseau hydrologique, surface entre cotes, etc).

Il existe deux principales formes de représentation des données graphiques : le mode *raster* et le mode *vecteur*. Dans le mode *raster*, le principe est une division régulière de l'espace sous forme de cellules (pixels). Les cellules définissent des unités de surface, un point est représenté par une cellule, une ligne par une succession de cellules, et un polygone par un groupe de cellules.

Dans le mode *vecteur*, la représentation s'appuie sur la structure des objets à représenter. Les objets spatiaux sont représentés par des points (exemple : point géodésique), des lignes ou arcs (ex : rivières) et des surfaces ou polygones (exemple : bassins versants). Le mode *vecteur* permet la représentation des objets dans un espace continu, et non pas discrétisé (raster) : les objets et leurs limites sont localisés avec précision dans un référentiel géographique ou cartésien.

L'acquisition de données géographiques se fait à partir de sources multiples (images de télédétection, cartes, fichiers, etc.) dans les deux types de formats.

3.3.2. MNT

L'analyse d'un modèle numérique de terrain (MNT) permet de calculer une série de paramètres caractérisant une surface en trois dimensions. En général, ces paramètres facilitent l'analyse de phénomènes de grande importance.

Le MNT de référence est obtenu par digitalisation des cartes au 1/100 000 de l'IGN péruvien, établies sur la base de photos aériennes et de relevés topographiques réalisés en 1992 ; avec une précision de 10 mètres en altitude.

3.3.3. Méthode

Pour l'élaboration du SIG on a utilisé le logiciel Arcview. C'est un logiciel développé par la société américaine Environmental Systems Research Institute (ESRI) compatible avec les données importées depuis ERDAS et le MNT.

Les étapes principales de la méthode employée sont les suivantes :

- Importation des données du travail de classification « spécialisée » avec le logiciel ERDAS.
- Importation des courbes de niveau topographique du MNT.
- Délimitation du bassin Paron, du bassin du lac Paron et bassin du lac Arteson.
- Détermination des surfaces à partir des courbes de niveau des bassins Paron, du lac Paron et du lac Arteson.
- Détermination des surfaces glaciaires à partir des courbes de niveau des bassins Paron, du lac Paron et du lac Arteson.
- Construction des courbes hypsométriques à partir des surfaces calculées aux étapes précédentes.

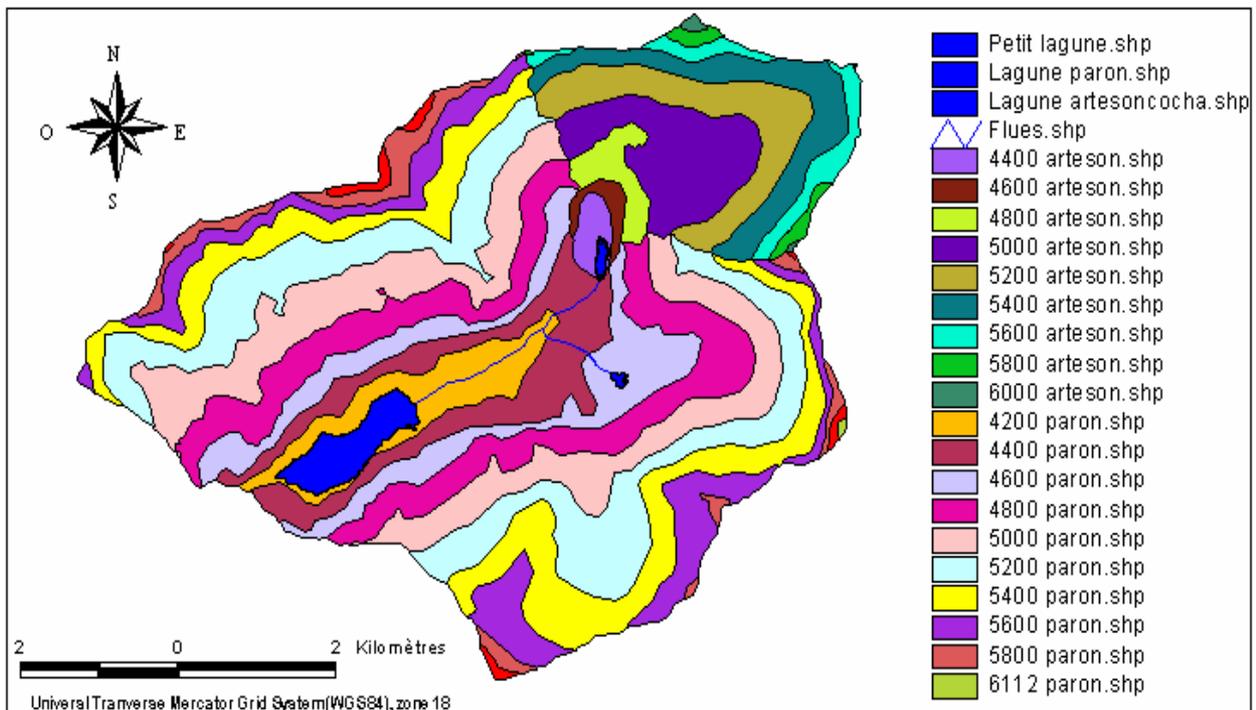


Figure 15 : Carte des bassins des lacs Paron et Arteson, où on peut voir la délimitation des surfaces en fonction de l'altitude.

3.3.4. Courbes hypsométriques

La détermination des courbes hypsométriques est importante parce qu'elle conduit à une représentation synthétique de la morphologie du bassin en donnant la distribution de la surface en fonction de l'altitude. Cette information sera utilisée dans le calcul de la distribution de précipitation selon une fonction de production (décrite plus loin).

La figure 16 montre les courbes hypsométriques des bassins Paron, du lac Paron et du lac Arteson.

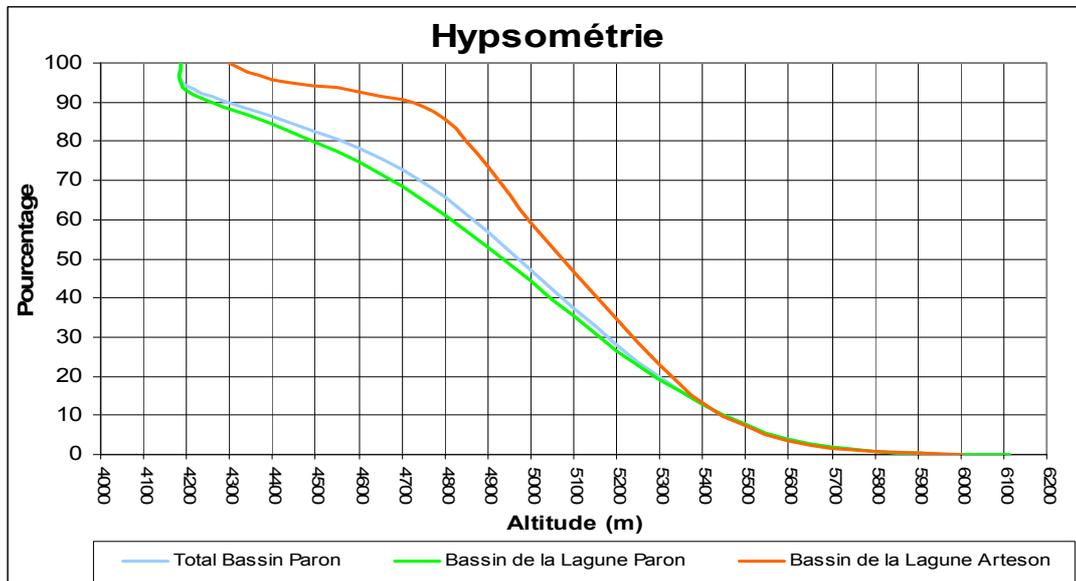


Figure 16 : Courbes hypsométriques des bassins Paron, lac Paron et lac Arteson.

3.4. Résultats

Pour le calcul des bilans hydriques qui sera abordé dans la suite de ce mémoire, les informations importantes suivantes ont été extraites de l'exploitation du SIG :

- **Surfaces des bassins versants :**

Bassin Paron : 44,3 km²

Bassin du lac Paron : 35,9 km²

Bassin du lac Arteson : 8,4 km²

- **Surfaces des glaciers :**

Bassin Paron : 18,8 km² (42 %)

Bassin du lac Paron : 12,4 km² (34,5 %)

Bassin du lac Arteson : 6,2 km² (74,2 %)

- **Surfaces des glaciers au - dessous de 5000 mètres de altitude :**

Bassin du lac Paron : 1,01 km²

Bassin du lac Arteson : 1,9 km²

- **Surface Glacier au - dessous de 5200 mètres de altitude :**

Bassin du lac Paron : 4,1 km²

Bassin du lac Arteson : 3,8 km²

- **Surfaces entre courbes de niveau (tableau 3)**

- **Surfaces non glaciaires entre courbes de niveau (tableau 4)**

On note que dans ce cas, de petites zones sans glacier de haute altitude (plus de 5600 mètres) sont assimilées aux glaciers parce que leurs comportements sont semblables à ceux des zones des glaciaires.

altitude	Bassin Paron		Bassin du lac Paron		Bassin du lac Arteson	
	surface (km2)	pourcentage	surface (km2)	pourcentage	surface (km2)	pourcentage
4185-4200	2,50	5,65	2,50	6,97	0,00	0,00
4200-4400	3,50	7,91	3,13	8,72	0,37	4,46
4400-4600	3,67	8,29	3,43	9,56	0,24	2,88
4600-4800	5,56	12,56	4,96	13,83	0,60	7,12
4800-5000	8,19	18,49	5,98	16,66	2,21	26,33
5000-5200	8,41	18,99	6,34	17,67	2,07	24,66
5200-5400	6,69	15,13	4,91	13,70	1,78	21,23
5400-5600	4,00	9,03	3,18	8,86	0,82	9,79
5600-5800	1,38	3,12	1,14	3,17	0,25	2,94
5800-6000	0,34	0,78	0,29	0,82	0,05	0,60
6000-6112	0,02	0,04	0,02	0,05	0,00	0,00
Totale	44,26	100,00	35,88	100,00	8,39	100,00

Tableau 3 : Distribution des surfaces selon les courbes de niveau.

cote	lac Paron surface (km2)	cote	Lac Arteson surface (km2)
4185-4200	*	4300-4400	0,37
4200-4400	0,31	4400-4600	0,23
4400-4600	0,34	4600-4800	0,43
4600-4800	4,91	4800-5000	0,51
4800-5000	5,02	5000-5200	0,11
5000-5200	0,32	5200-5400	0
5200-5400	0,64	5400-5600	0
5400-5600	0,10	5600-5800	0
5600-5800	0	5800-6000	0
5800-6000	0		
6000-6112	0		

*En Fonction du niveau du Lac

Tableau 4 : Distribution des surfaces non glaciaires dans les bassins des lacs Paron et Arteson

Les discussions et conclusions obtenues à partir des informations traitées dans ce chapitre seront détaillées au chapitre 6 et 7.

4 . ELEMENTS DU SYSTEME ET DONNEES DISPONIBLES

4.1. Hypothèses de travail

Notre but est d'établir les variations de la ressource en eau à l'exutoire du bassin Paron en fonction :

- du volume d'eau disponible dans le lac Paron,
- du niveau du lac Arteson.
- des données climatiques (pluie, évaporation, etc.)

Le volume de la ressource en eau est une donnée très importante pour les principaux utilisateurs : production d'électricité à la centrale de « Huayanca » et agriculture irriguée en saison sèche.

L'étude du bilan hydrique va nous donner une première approximation de la disponibilité des ressources hydriques, en précisant l'évolution de cette ressource et en comparant le comportement d'un bassin fortement englacé (Lac Arteson ; 74,2% de surface glaciaire) avec autre moins englacé (Lac Paron ; 34,5% de surface glaciaire).

Nous allons présenter dans ce chapitre les données disponibles et les hypothèses sous lesquelles elles seront employées.

4.2. Les données disponibles

Les données disponibles proviennent du « Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) », de l'unité de Glaciologie de l'« Instituto Nacional de Recursos Naturales del Perú (INRENA) » et de l'unité GREATICE de l'IRD.

4.2.1. Choix du pas de temps de travail.

La plupart des données dont nous disposons ont été obtenues grâce à des enregistrements journaliers. C'est le cas de la pluviométrie et du niveau des deux lacs. On dispose aussi de la hauteur d'ouverture de la vanne du lac Paron (au pas de temps horaire). Toutefois ces données sont entachées de très nombreuses lacunes.

Dans un objectif de gestion de la ressource en eau, il serait préférable de conserver ce pas de temps journalier. Malheureusement, les lacunes conduiraient souvent à des approximations grossières pour obtenir des valeurs dont il serait difficile de

vérifier la pertinence hydrologique. Ce serait, par exemple, le cas pour contrôler les ouvertures de la vanne du lac Paron, dont l'étalonnage est douteux, ou pour la détermination de l'écoulement glaciaire faisant appel à des débits spécifiques très faibles.

C'est pour ces raisons qu'il a été décidé de travailler, en première approche, au pas de temps décadaire. La description simplifiée des processus hydrologiques qui sera réalisée au cours de ce travail, permettra d'identifier les paramètres hydrologiques les plus pertinents dans un bassin glaciaire de haute montagne.

4.2.2. Bassin du Lac Arteson

L'observation du lac Arteson a commencé au cours de l'année 1996 avec l'installation d'un limnigraphe du type Chloe à l'exutoire du lac afin de connaître la variation des niveaux du lac. Il n'y a pas de pluviomètre ou de pluviographe dans ce petit bassin, mais comme la différence d'altitude et la distance avec le lac Paron sont minimales, on peut utiliser les données de précipitations mesurées sur ce dernier. Il n'y a pas non plus de mesure d'évaporation.

4.2.3. Bassin du lac Paron

Le contrôle des caractéristiques hydrologiques de ce bassin est plus complet que pour le lac Arteson à cause de l'utilisation de l'eau lâchée pour la production d'électricité à la centrale hydroélectrique de « Huayanca » :

- Les observations pluviométriques à proximité de l'exutoire du lac Paron ont commencé dès 1949 avec l'installation d'un pluviomètre totaliseur.
- Pour le contrôle des niveaux d'eau destinés à la production électrique, une échelle limnimétrique a été installée pendant la construction des tunnels de fuites et des vannes.
- Une courbe caractéristique hauteur / volume a été établie pour connaître la variation du volume utile du lac.

Par contre :

- Il n'y a pas de mesure de l'évaporation sur le lac Paron (ou de paramètres climatologiques permettant de calculer cette évaporation).
- Le débit à l'exutoire du lac n'est pas connu à cause des difficultés d'étalonnage des vannes (cette question fait l'objet d'un traitement détaillé spécifique dans la section suivante).

Il est important de noter à ce stade que les observations de la précipitation et des niveaux du lac sont au pas de temps journalier et que les ouvertures de vanne de prélèvement sont connues au pas de temps horaire.

4.2.4. Problèmes de contrôle des vannes du Lac Paron.

La plupart des informations disponibles sur la retenue de Paron et sa gestion viennent du technicien d'EGENOR (entreprise de production électrique) en poste à proximité du lac qui fait une mesure quotidienne pour la pluviométrie et le niveau du lac à 8 heures du matin.

L'ouverture de la vanne est fonction de la demande de l'eau à la centrale hydroélectrique. Par exemple, si la centrale hydroélectrique demande un lâcher de $8\text{m}^3/\text{s}$, le technicien présent à Paron ouvre la vanne selon la demande. Le problème est de connaître alors le débit réel d'eau qui sort du Lac Paron.

En effet, l'entreprise qui a construit la vanne dans les années 80 a fourni une courbe d'étalonnage qui donne le débit en fonction de l'ouverture de la vanne et du niveau du lac qui fait varier la pression de l'eau.

Après l'installation de la vanne, le fonctionnement hydraulique de l'ouverture et de la fermeture a présenté des dysfonctionnements ; par exemple, lorsque la vanne est complètement fermée et que la courbe d'étalonnage indique un débit nul, on observe quand même un écoulement. Des contrôles de mesure de débit entrepris avec des personnels d'EGENOR et de l'INRENA ont confirmé la grande différence entre le débit effectif et le débit donné par la courbe d'étalonnage. On ne peut donc pas prendre en compte les courbes d'étalonnage pour calculer le débit de sortie.

Une autre chose importante est de noter que l'ouverture de la vanne est exprimée en centimètres. Sur le cahier de notes de l'opérateur, on trouve les dimensions d'ouverture de la vanne (en cm) et le débit demandé par la centrale de production hydroélectrique. Le problème est que l'opérateur ouvre la vanne selon un critère personnel et non pas technique ; par exemple, pour une demande de $8\text{ m}^3/\text{s}$, lors de deux journées différentes avec le même niveau d'eau dans le lac, on observe des ouvertures différentes. Il n'est donc pas possible d'utiliser directement les données de débit de sortie notées dans le cahier de l'opérateur.

La notation des données de l'ouverture de la vanne en centimètres présente une autre difficulté. En effet, l'ouverture de la vanne varie dans un intervalle de 0 à 100 cm et l'indicateur d'ouverture donne des valeurs comprises entre 0 et 50 cm. Un exemple permet de mieux comprendre : quand l'indicateur de la vanne (0-50 cm) indique 1 cm, la vanne (0-100 cm) est ouverte de 2 cm. L'ambiguïté est que dans le cahier, l'opérateur indique certains jours les centimètres d'ouverture de la vanne et d'autres jours les centimètres de l'indicateur de la vanne !

C'est pour cette raison qu'avant de déterminer le débit de sortie du lac Paron, il est nécessaire de reconstituer les données d'ouverture de la vanne (cm) et de déterminer une courbe donnant l'étalonnage réel de la vanne.

L'ouverture de la vanne ne reste pas constante et peut varier beaucoup au cours de la journée. Par exemple, au cours du 18 Janvier 2002 on relève : 1 cm de 0h00 à

10h25, 12 cm de 10h25 à 12h00 , 22 cm de 12h00 à 16h35 et 28 cm de 16h35 jusqu'au jour suivant.

Les opérations d'ouverture et de fermeture de la vanne sont plus fréquentes pendant la saison sèche (juin ,juillet et août) que pendant la saison des pluies pendant laquelle la centrale hydroélectrique dispose de ressources provenant des précipitations.

La nouvelle courbe d'étalonnage a été établie sur la base d'observations simples sur le débit de sortie. Elle s'exprime sous la forme d'une seule équation.

$$Q = H * H * (-0,0036 * U * U - 0,0037 * U - 0,0002) + H * (0,0964 * U * U + 0,8169 * U + 0,0124) + (-8,2014 * U * U + 24,552 * U - 0,1913) \dots(1)$$

Où :

H : h - 4150

h : hauteur du niveau du lac en mètres au dessus du niveau de la mer
4150 : cote minimale du lac

U : u / 2

u : ouverture de la vanne (1à 100) en cm

Q : débit de sortie en m³/s.

Pour corriger les données d'ouverture de la vanne, on compare sa valeur d'ouverture avec la variation journalière du niveau du lac. On note qu'à partir de l'année 2000 les indications fournies par le cahier de l'observateur sont plus cohérentes. Sur la figure 17, on peut observer la réponse du niveau du lac à une ouverture de la vanne.

Pour tenter de remédier à tous ces inconvénients, un nouveau dispositif de contrôle a été installé en avril 2003 afin de savoir quels sont les débits réels qui sortent du lac Paron.

Le tableau 5 récapitule les données existantes depuis le début de l'année 1996, sur les bassins des lacs Paron et Arteson.

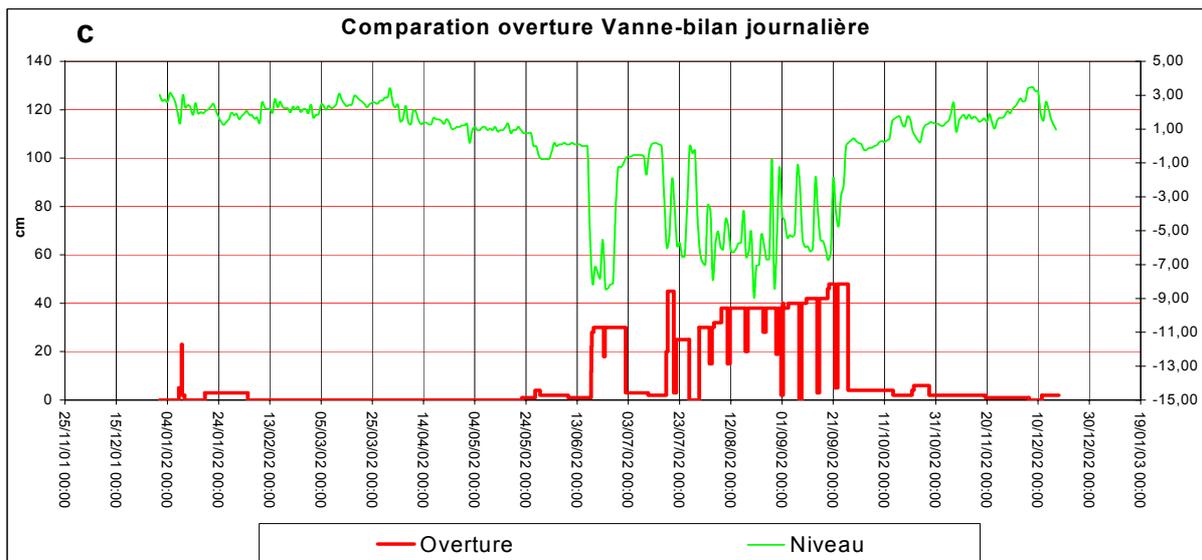
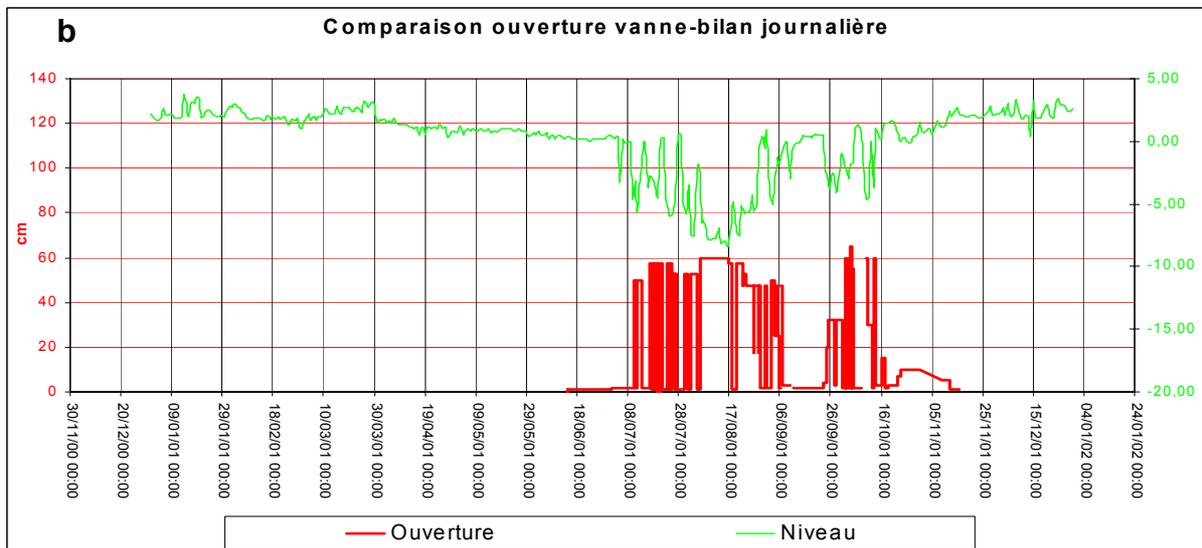
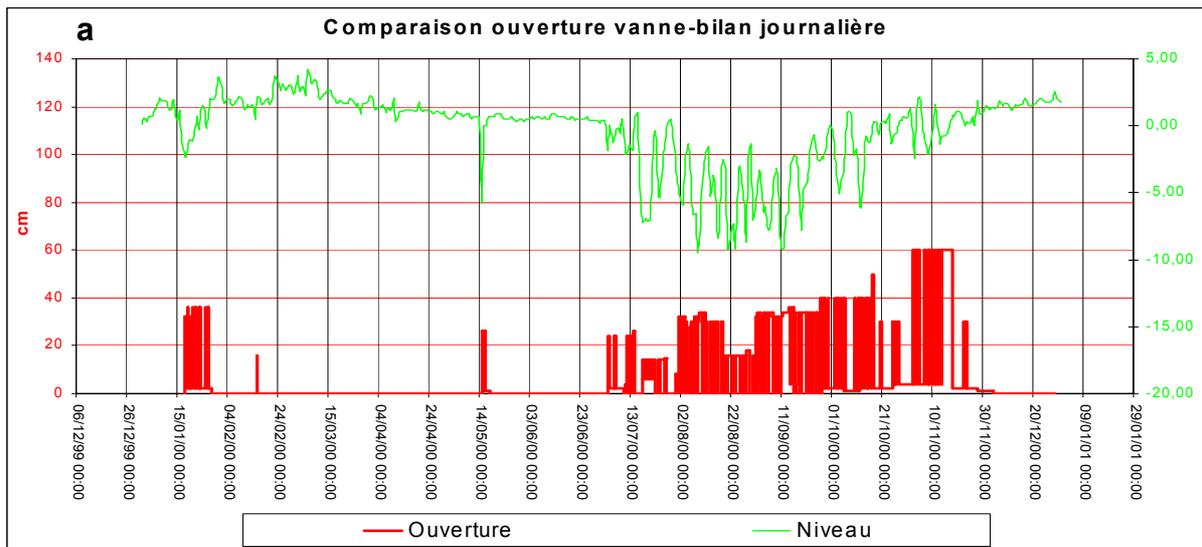


Figure 17 a, b, c : Comparaison de l'ouverture de la vanne avec la variation journalière du niveau du lac pour les années 2000, 2001 et 2002 respectivement

4.2.5. Régionalisation des précipitations

Le bassin Paron est caractérisé par un grand dénivelé depuis du niveau le lac Paron jusqu'au sommet du massif le plus haut. Il est établi que les précipitations varient selon l'altitude (Pouyaud, 2002). Avec la présence d'un seul pluviomètre à 4200 mètres, il est difficile de reconstituer la pluie à des altitudes plus élevées et il n'est pas possible non plus de considérer les données de ce seul pluviomètre pour toute la surface du bassin Paron.

En régionalisant la précipitation dans le bassin du Rio Santa (Pouyaud, Yerren, Zapata et Al, 2003), on a pu déterminer quelles sont les stations pluviométriques des autres bassins qui ont des comportements pluviométriques similaires avec le bassin Paron. Dans le tableau 6, on donne les caractéristiques de ces stations qui sont localisées (figure 18) sur une carte du bassin du Rio Santa avec ses régions pluviométriques.

Station Pluviométrique	Latitude	Longitude	Altitude (mètres)	Pluie année hydrologique(mm)
Parón	08:59:57	77:41:05	4215	830
Llanganuco	09:04:43	77:39:05	3918	637
Yungay	09:09:09	77:44:28	2557	324

Tableau 6 : Descriptif des stations cohérentes avec celle du bassin Paron

En utilisant les observations de ces stations, on établit une relation entre la pluviométrie cumulée sur une année hydrologique et l'altitude :

$$P = 0.2821 * H - 408.50 \dots\dots\dots(2)$$

Où :

P : Pluviométrie calculée (mm).

H : Altitude du terrain où on souhaite calculer la pluie.

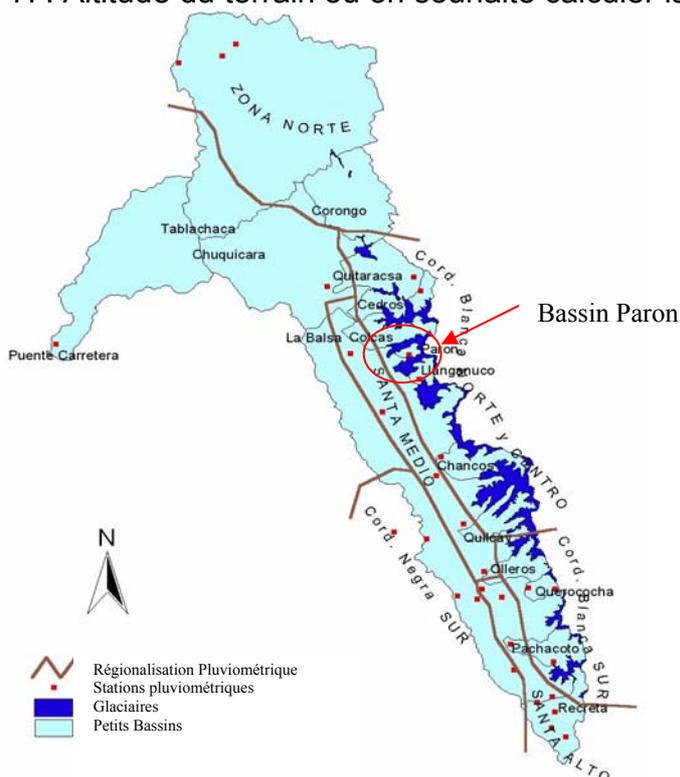


Figure 18 : Bassin du Rio Santa avec les différentes régions pluviométriques.

5. METHODE DU BILAN DE MASSE

Le concept de bilan s'applique à toute propriété extensive (« mesurer une quantité de « quelque chose contenue dans le système ou ses éléments » (Ambroise, 1999), représentant une quantité stockée dans le système. Une telle propriété ne peut varier au cours du temps que de deux façons en contrôlant la variation de stock : soit par un transfert externe d'une certaine quantité, s'exprimant en terme de flux entrants ou sortants et traduisant des échanges du système avec son environnement ; soit par un processus de transformation interne (production, destruction) d'une certaine quantité à l'intérieur même du système, s'exprimant en terme de source (production) ou de puits (destruction) et traduisant des « échanges » avec d'autres formes extensives de matière ou énergie qui sont alors affectées de transformation inverses dans le système.

C'est ce qu'exprime dans sa forme la plus générale, l'équation du bilan de la propriété extensive X, où, par convention, on compte positivement ce qui contribue à augmenter sa quantité dans le système ; et négativement, ce qui contribue à la diminuer. « Toute variation ΔX au sein d'un système donné et au cours d'une période donnée peut être considérée comme la somme de quatre termes représentant les contributions algébriques de ces différents processus » (Ambroise, 1999).

$$\Delta X = [X_{\text{final}} - X_{\text{initial}}] = [\Sigma X_{\text{entré}} - \Sigma X_{\text{sorti}}] + [\Sigma X_{\text{produit}} - \Sigma X_{\text{détruit}}] \dots (03)$$

Variation de quantité
Transferts par échange avec l'environnement
Transformations internes au système

Cette forme très générale du bilan extensif est valable pour le bassin Paron qui est un système ouvert (les transferts externes ne sont pas nuls), conservatif (lorsque les termes de transformation interne sont nuls, la quantité ne varie que par échange avec l'environnement), et transitoire (il y a une variation de ΔX).

5.1. Bilan du système lacustre

L'équation 04 donne l'expression générale du bilan hydrique pour un système lacustre, peut être simplifiée dans le cas spécifique de notre application.

Sur un intervalle de temps t , l'équation générale du bilan hydrique d'une retenue découle de l'application du principe de la conservation de la masse (i.e. des volumes d'eau). Elle peut s'écrire :

$$\Delta V = (V_r + V_{ecs} + V_p + V_f) - (V_{ev} + V_d + V_{vi} + V_i + V_u) \dots \dots \dots (04)$$

Où,

ΔV : Variation de stock dans la retenue. Elle est mesurée très précisément à partir de l'enregistrement limnigraphique et de la courbe de cubature de la retenue.

V_r : Apports en provenance du ruissellement des versants non englacés.

V_{ecs} : Apports souterrains.

V_p : Apports des précipitations tombant directement sur la retenue. Ils sont connus précisément à partir des enregistrements pluviométriques.

V_f : Apports dus à l'ablation des glaciers.

V_{ev} : Volume de l'eau évaporé. Il est connu en multipliant l'évaporation décadaire par la surface moyenne de la retenue établie sur la même décade.

V_d : Volume d'eau sortant de la retenue par déversement. Il est connu avec une bonne précision lorsque le déversoir est étalonné ; pour la plupart des lacs, on se contente d'appliquer une formule de déversoir adaptée à sa géométrie.

V_{vi} : Volume sortant par la vanne de vidange ; il est connu par l'intermédiaire des observateurs qui notent les cotes de début et de fin de vidange ainsi que la durée de vidange.

V_i : Pertes par infiltration. Les infiltrations à travers la digue sont estimées à partir de mesures ponctuelles des débits ; les infiltrations vers les nappes sont connues par bouclage du bilan.

V_u : Volume d'eau prélevé pour divers usages. Il est estimé à partir d'observations simples : observation des temps de pompage ou estimation à partir des surfaces cultivées.

L'application de ce bilan hydrologique à l'échelle décadaire permet de comparer l'écoulement annuel au volume de la retenue, le rapport entre ces deux grandeurs donne une idée du remplissage au cours de l'année.

5.2. Hypothèses à considérer

5.2.1. Ligne d'équilibre des glaciers

Comme nous l'avons indiqué, la ligne d'équilibre des glaciers peut varier selon les conditions climatiques et topographiques ; pour l'étude du bilan hydrique des bassins des lacs Paron et Arteson, on considère que cette ligne correspond à une courbe de niveau. On travaillera sous deux hypothèses d'altitude : 5000 et 5200 mètres.

5.2.2. Fonte de la glace

On admet que l'écoulement spécifique dû à l'ablation des glaciers des bassins du lac Paron et du lac Arteson est le même, selon la relation :

$$\frac{Q_{\text{glacier Paron}}}{S_{\text{ablation Paron}}} = \frac{Q_{\text{glacier Arteson}}}{S_{\text{ablation Arteson}}} \dots\dots\dots(05)$$

Où ,

$Q_{\text{glacier Paron}}$: Débit glaciaire venant des surfaces d'ablation du bassin du lac Paron en m^3/seg .

$Q_{\text{glacier Arteson}}$: Débit glaciaire venant des surfaces d'ablation du bassin du lac Arteson en m^3/seg .

$S_{\text{ablation Paron}}$: Surface cumulée d'ablation du glacier qui se trouve en dessous de la ligne d'équilibre dans le bassin du lac Paron, en m^2 .

$S_{\text{ablation Arteson}}$: Surface cumulée d'ablation du glacier qui se trouve en dessous de la ligne d'équilibre dans le bassin du lac Arteson, en m^2 .

5.2.3. Evaporation (Vev)

Comme il n'y a pas de donnée d'évaporation sur les deux lacs étudiés, nous avons considéré qu'elle est la même pour tous les lacs glaciaires du bassin du Rio Santa afin d'utiliser les observations d'un lac voisin.

5.2.4. Infiltration (Vi)

La perte d'eau par infiltration est considérée comme négligeable dans les deux lacs. La vidange du lac Paron réalisée dans les années 80 a confirmé qu'une infiltration au travers du barrage naturel n'est observée que pour les 10 mètres supérieurs. Comme le lac Paron a plus de 50 mètres de profondeur, cette hypothèse est recevable. Dans le cas du lac Arteson en l'absence d'information, on admet la même hypothèse que pour le lac Paron.

$$V_i = 0 \dots\dots\dots(06)$$

5.2.5. Pluie sur les lacs (Vp)

Dans le bassin du lac Arteson, il n'y a pas de mesure de pluie, au contraire du lac Paron qui possède une longue chronique de pluie. Comme la différence d'altitude (moins de 80 mètres) et la distance entre les lacs Paron et Arteson (moins de 3,5 kilomètres) sont faibles, on peut admettre que la pluie qui tombe sur le lac Paron est la même qui tombe sur le lac Arteson.

$$V_{p \text{ lac Paron}} = V_{p \text{ lac Arteson}} \dots\dots\dots(07)$$

Où ,

$V_{p \text{ lac Paron}}$: Pluie qui tombe sur le lac Paron.

$V_{p \text{ lac Arteson}}$: Pluie qui tombe sur le lac Arteson.

5.2.6. Apports souterrains (Vecs)

A cause des caractéristiques des formations géologiques et de l'altitude, nous admettons qu'il n'y a pas d'apport souterrain provenant de bassins extérieurs.

La figure 19 montre les éléments du bilan dans une représentation graphique du comportement physique du bassin Paron.

5.2.7. Ruissellement des versants non glaciaires

Comme le deux sous-bassins versants (lac Paron et Arteson) sont emboîtés dans le bassin Paron et relèvent de la classification « Puna – Jalca » pour l'occupation du sol, on admet que le coefficient de ruissellement des versants non englacés est constant dans tout le bassin.

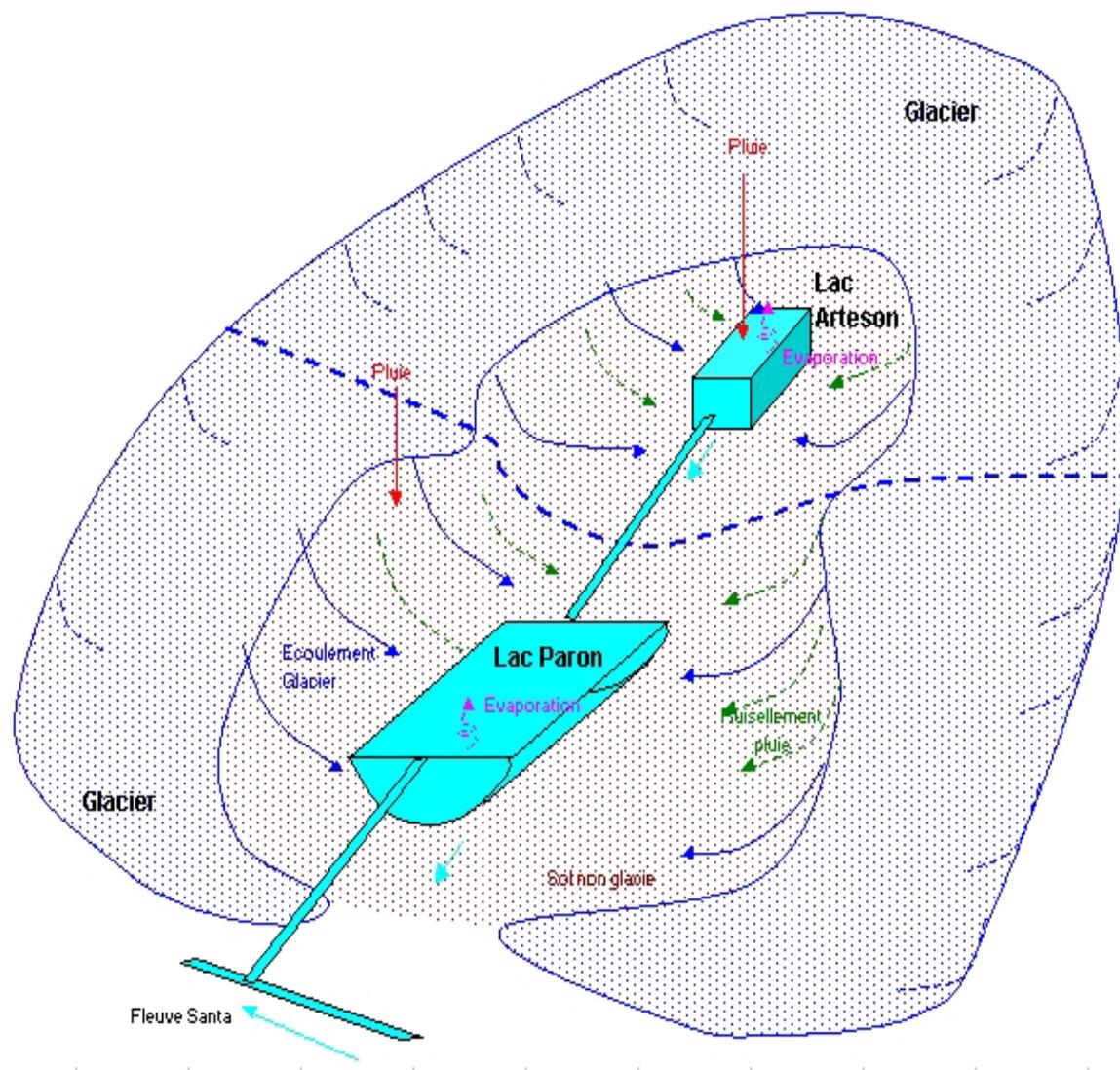


figure 19 : Schéma simplifié du comportement hydrique du système lacustre du bassin Paron.

5.3. Méthodologie de calcul du bilan

Nous avons décidé de considérer que la structure du bassin du lac Arteson était de type « hydrologique » (fonctionnement naturel) et celle du lac Paron de type « hydraulique » (fonctionnement contrôlé artificiellement) (Caballero, 1998).

Pour une meilleure compréhension, le travail d'analyse a été divisé en trois étapes, d'abord l'analyse du système hydrologique du lac Arteson, puis celle du système hydraulique du lac Arteson ; enfin, pour rapprocher les fonctionnements des deux bassins, nous avons utilisé un paramètre commun qui est le débit spécifique des versants glaciaires.

Avant de traiter les trois étapes de l'étude, il est nécessaire de décrire la méthode de traitement de la fonction de production d'écoulement non glaciaire.

5.3.1. Fonction de production d'écoulement non glaciaire

Dans l'équation de bilan hydrique d'un système lacustre (équation 04), le paramètre V_r est très important. Ce paramètre représente l'apport d'eau au lac qui vient des écoulements de la surface non glaciaire. L'équation que nous allons utiliser est :

$$V_r = \sum (V_r \text{ partiels})$$

Où :

V_r : Apports en provenance du ruissellement des versants non englacés ($m^3/décade$).

$\sum (V_r \text{ partiels})$: Cumul des apports partiels (V_r partiel) des écoulements par tranches d'altitude ($m^3/décade$).

$$V_r \text{ partiel} = a \ P \ S_v$$

Où :

a : Coefficient de ruissellement (sans dimension)

P : Précipitation ($m/décade$) ; elle est en fonction de l'altitude selon l'équation du gradient pluviométrique et l'altitude moyenne entre cotes limites de la surface (équation 02).

S_v : Surface (m^2) des tranches de terrain entre cotes où tombe la pluie (tableau 4) ; elle est obtenue à l'aide du SIG.

- Le coefficient de ruissellement « a » **est considéré comme un paramètre de calage** du bilan hydrique ; pour ce type d'occupation du sol (Puna et Janca), il se trouve dans l'intervalle [0,2 ; 0,4].
- Pour faire le calage de ce coefficient, nous avons considéré que la production d'écoulement est *totale* sur la décade, c'est à dire que, pour une précipitation donnée d'une décade « d », toute l'eau de cette précipitation s'écoulera dans la même décade et qu'elle parviendra au lac sans faire intervenir de retard qui reporterait cet apport à la décade suivante.

5.3.2. Système hydrologique du bassin du lac Arteson.

Avec l'utilisation de l'équation 04 (bilan du système lacustre), le bilan hydrologique du lac Arteson s'écrit de la manière suivante :

$$\Delta V = V_r + V_p + V_f - V_{ev} - V_d - V_u$$

Dans cette équation, le paramètre V_u est nul parce que il n'y a pas de prélèvements d'eau et l'unique paramètre inconnu est V_f . Avec cette simplification on peut définir l'équation de bilan du lac Arteson comme :

$$V_f = \Delta V - V_p - V_r + V_{ev} + V_d \dots\dots\dots(08)$$

Où les unités sont en $m^3/décade$.

Pour la détermination de ΔV (variation du volume du lac), on a considéré que la surface du lac est horizontale (figure 17). Cette affirmation est étayée parce que l'ordre de grandeur des variations du niveau est centimétrique, alors que pour le lac Paron, il est métrique.

Le paramètre V_r est le produit de l'écoulement de la surface non glaciaire, qui varie avec la pluie et du coefficient de ruissellement (compris entre 0,2 et 0,4). Avec cette indication, on peut exprimer V_f comme une fonction de V_r :

$$V_f(V_r) = \Delta V - V_p - V_r + V_{ev} + V_d$$

Le calcul du paramètre V_r a été détaillé précédemment dans l'étude de la fonction de production des écoulements non glaciaires.

5.3.3. Fonction de production des glaciers

Le modèle que nous avons choisi est très simple. Ce choix est justifié par le but de notre travail, qui est d'établir une approximation des éléments du bilan hydrique qui interviennent dans ce système lacustre de haute montagne.

La détermination de la fonction de production glaciaire est importante pour déterminer le bilan du lac Paron. Pour corréliser le débit des glaciers du lac Arteson avec ceux du lac Paron, on a utilisé l'hypothèse de l'équation 05 qui se base sur l'invariance du débit spécifique :

$$Q_{\text{spécifique}} = \frac{Q_{\text{glacier}}}{S_{\text{ablation}}} \dots\dots\dots(09)$$

Où , le débit spécifique est en m³/décade.m².

La surface d'ablation est fonction de l'altitude de ligne d'équilibre du glacier :

S_{ablation} = Surface en dessous de la ligne d'équilibre glacier

L'altitude moyenne de la ligne d'équilibre des glaciers se situe entre 5000 et 5200 mètres dans les régions tropicales.

Dans notre étude du bilan hydrique des deux lacs, la position moyenne de la ligne d'équilibre est considérée comme un autre **paramètre de calage**. Les surfaces glaciaires sous la ligne d'équilibre ont été calculées à l'aide du SIG :

- Surface de glacier en dessous de 5000 mètres :

Bassin du lac Paron : 1,01 km²
Bassin du lac Arteson : 1,88 km²

- Surface glacier en dessous de 5200 mètres :

Bassin du lac Paron : 4,13 km²
Bassin du lac Arteson : 3,75 km²

Pour le débit glaciaire de l'équation 09, on prend Vf déterminé par le calcul du bilan du lac Arteson.

5.3.4. Système hydraulique du bassin du lac Paron.

L'équation 04 (bilan du système lacustre) pour le système de Paron peut s'exprimer selon :

$$\Delta V = V_r + V_p + V_f - V_{ev} - V_{vi} - V_u \dots\dots\dots(10)$$

Dans cette équation le paramètre V_u est négligeable comme pour Arteson. Par comparaison avec Arteson, le paramètre V_d devient V_{vi} (à Paron, il y a une vanne et non un déversoir). L'unique paramètre inconnu est V_f , mais il est déductible de l'équation 09, où le débit spécifique est celui obtenu pour le lac Arteson et le rapport des surfaces glaciaires est extrait du SIG.

Pour valider le bilan, on doit choisir une grandeur calculée de ce bilan à comparer avec des observations de terrain. Le meilleur paramètre de validation est le débit de sortie par la vanne du lac Paron.

L'équation 10 s'écrit :

$$V_{vi} = -\Delta V + V_r + V_p + V_f - V_{ev} - V_u + V_{Arteson} \dots\dots\dots(11)$$

Où les unités sont en $m^3/décade$. On note dans cette équation le paramètre $V_{Arteson}$ qui exprime le débit qui sort du lac Arteson et se jette dans le lac Paron.

- On admet que tout le débit qui sort du lac Arteson arrive au lac Paron (il n'y a pas de perte par infiltration ou évaporation en raison de la faible distance et de la pente significative entre les deux lacs).

ΔV et V_p sont calculés avec la courbe de la surface du réservoir et le niveau de l'eau dans le lac respectivement.

• La surface du réservoir et variation de son volume

Dans l'étude des mécanismes qui concernent la surface du réservoir (pluie directe et évaporation), les variations de niveau du lac Paron sont très significatives à la différence du lac Arteson. C'est la raison pour laquelle nous devons tenir compte de la variation de la surface du réservoir avec le niveau du lac.

Nous disposons des relations niveau - volume du réservoir et niveau - surface du réservoir pour le lac Paron.

Dans notre bilan, nous estimons la surface du réservoir et la variation du volume en fonction de la cote du lac (Figures 20 et 21).

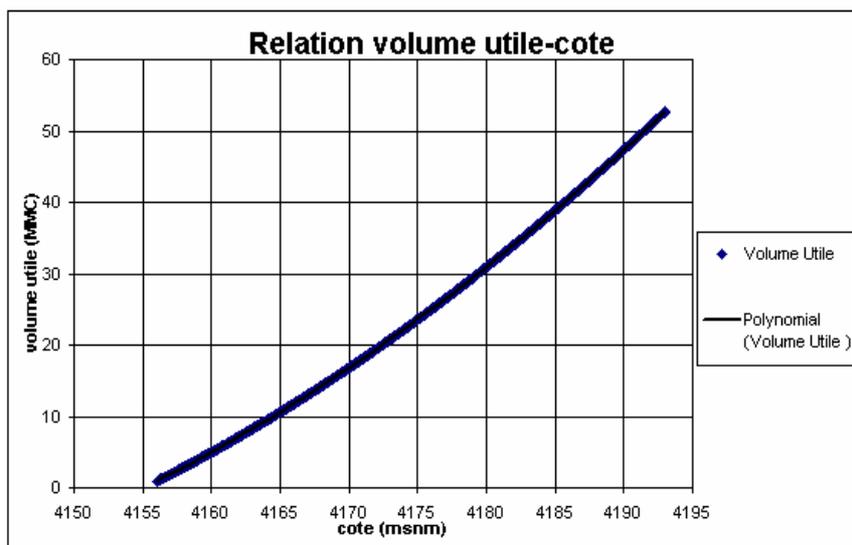


Figure 20 : Relation entre le volume et le niveau de l'eau du lac Paron.

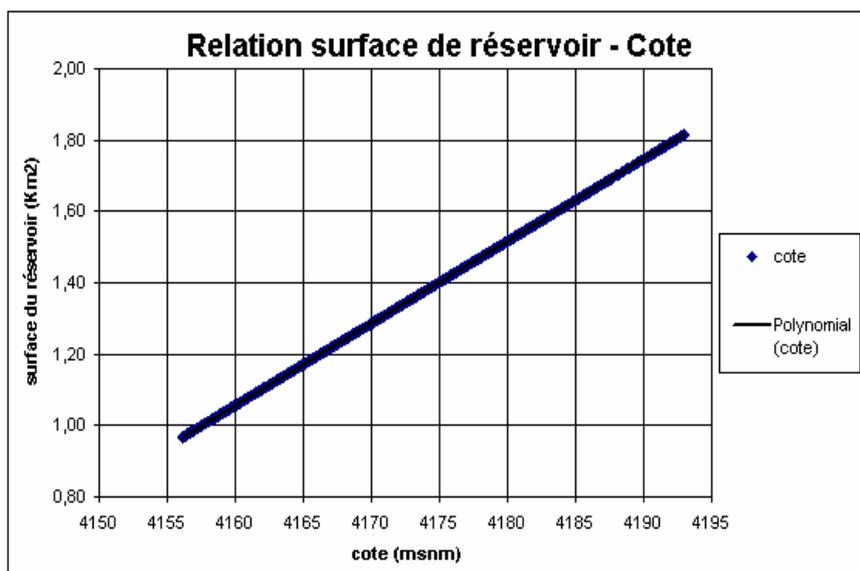


Figure 21 : Relation entre la surface de retenue et le niveau de l'eau du lac Paron.

Ces rapports s'expriment par les relations suivantes :

- Volume d'eau = $0,0115 * Cote^2 - 94,612 * Cote + 194578$ $R^2 = 1$
- Surface de réservoir = $6 E-17 * Cote^2 + 0,023 * Cote - 94,624$ $R^2 = 1$

5.3.5. Evaporation

Les valeurs de l'évaporation dans le bassin Paron ne sont pas connues ; nous nous sommes servis de données mesurées sur un autre lac du bassin du Rio Santa : le lac Querococha (4037 mètres d'altitude), où pour lequel une évaporation annuelle de 1200 mm a été établie (Vignon, 2002). Pour le calcul au pas de temps décadaire, on a utilisé la distribution observée sur l'année au lac Titicaca (PELT, 1993) à 3800 mètres d'altitude.

5.3.6. Critères utilisés pour l'ajustement du modèle

Le calcul du bilan utilise comme paramètre de validation le débit qui sort du lac Paron et comme paramètre de calage le coefficient de ruissellement de la zone non englacée et la position de la ligne d'équilibre des glaciers. L'efficacité du bilan sera mesurée avec le critère de Nash et le rapport des volumes totaux :

- Le rapport du volume total calculé sur le volume total mesuré (RAP) permet de quantifier la reproduction des bilans volumiques sur la période considérée.

$$RAP = \frac{\sum Vol_{calculé}}{\sum Vol_{mesuré}}$$

- Le critère de Nash (NASH), souvent utilisé en modélisation hydrologique (Caballero, 2001), permet de quantifier la simultanéité des événements simulés et observés.

$$NASH = 1 - \frac{\sum (VOL_{simulé} - VOL_{mesuré})^2}{\sum (VOL_{mesuré} - \overline{VOL_{mesuré}})^2}$$

$$\frac{\sum (VOL_{simulé} - VOL_{mesuré})^2}{\sum (VOL_{mesuré} - \overline{VOL_{mesuré}})^2}$$

Cette expression $\frac{\sum (VOL_{simulé} - VOL_{mesuré})^2}{\sum (VOL_{mesuré} - \overline{VOL_{mesuré}})^2}$ tend vers 1 lorsque $VOL_{simulé}$ tend vers $VOL_{mesuré}$. Le terme donne la variance résiduelle par rapport à la variance totale observée.

6. RESULTATS ET DISCUSSION

6.1 Résultats

6.1.1. Lac Paron

Pour le calage du bilan sur le lac Paron (système hydraulique) nous avons deux paramètres : le coefficient de ruissellement de la surface non glaciaire (K_r) et la position moyenne de la ligne d'équilibre des glaciers.

La ligne d'équilibre des glaciers a été testée sur la base d'études précédentes sur les glaciers tropicaux pour deux positions : à 5200 et 5000 mètres d'altitude. Plusieurs valeurs du coefficient de ruissellement ont été testées entre 0,2 et 0,4. Tout le travail de calage a été réalisé sur le débit de sortie du lac Paron.

Les critères que nous avons utilisés pour mesurer l'efficacité de notre travail sont au nombre de trois : le coefficient de Nash (NASH), le rapport du volume simulé sur le volume total observé (RAP) et la représentation graphique du débit de sortie.

Sur la base de ces choix, les données qui sont les plus fiables sont celles des trois dernières années (2000, 2001 et 2002) pour la validation avec la représentation graphique ; pour la validation avec Nash et RAP, on utilise seulement les deux dernières années (2001 et 2002).

- **Ligne d'équilibre des glaciers à 5000 mètres d'altitude**

Le tableau 7 donne les résultats obtenus avec l'hypothèse d'une ligne d'équilibre des glaciers à 5000 mètres d'altitude.

	2001		2002	
K_r	RAP	NASH	RAP	NASH
0,20	0,647	0,901	0,98	0,97
0,25	0,718	0,912	1,01	0,97
0,30	0,881	0,934	1,02	0,96
0,35	0,922	0,929	1,06	0,96
0,40	0,933	0,915	1,15	0,94

Tableau 7 : Résultats des critères (RAP et NASH) sur le débit du sortie du lac Paron avec différents coefficients de ruissellement et la ligne d'équilibre du glacier à 5000 mètres d'altitude.

Avec une ligne d'équilibre du glacier à 5000 mètres, on note qu'en 2001 le RAP est très inférieur par comparaison à 2002. En 2001, lorsque le K_r augmente, RAP s'améliore beaucoup, le meilleur RAP étant obtenu pour des valeurs de K_r entre 0,3 et 0,4. En 2002 le comportement du RAP est identique, mais avec la différence que

la meilleure réponse est obtenue pour K_r entre 0,2 et 0,3. Le RAP de 2002 commence à être très exagéré pour $K_r=0,4$.

Le critère de Nash nous permet de mesurer l'efficacité du bilan. Les valeurs de ce coefficient sont très bonnes pour les deux années étudiées. En 2001 on observe que la meilleure réponse du modèle de bilan est obtenue avec un K_r entre 0,3 et 0,4 et une plus faible avec un K_r de 0,2. En 2002 NASH présente des résultats très bons comme en 2001. La meilleure réponse est obtenue pour K_r entre 0,2 et 0,3, le résultat plus faible $K_r=0,4$.

Avec la précision dont nous avons déjà discuté, pour une ligne d'équilibre des glaciers à 5000 mètres d'altitude, un coefficient de **K_r de 0,3** est le plus acceptable en fonction des critères NASH et RAP.

Pour vérifier grossièrement la correspondance du débit calculé à la sortie de la vanne du lac Paron avec le débit mesuré, on peut se reporter aux représentations graphiques (figures 22 , 23 et 24).

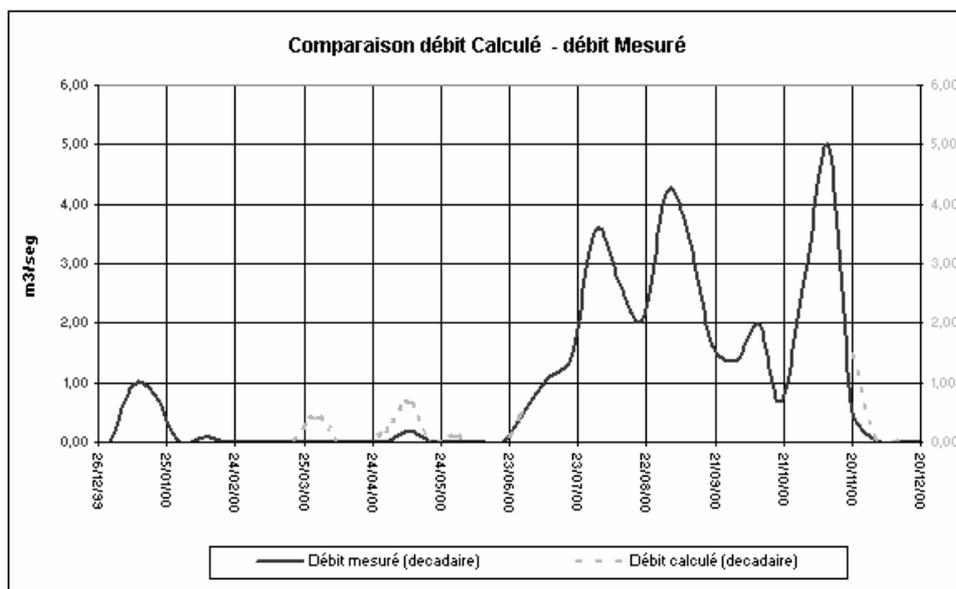


Figure 22 : Résultat du bilan du lac Paron pour l'année 2000 avec un K_r de 0,3 et une ligne d'équilibre des glaciers à 5000 mètres.

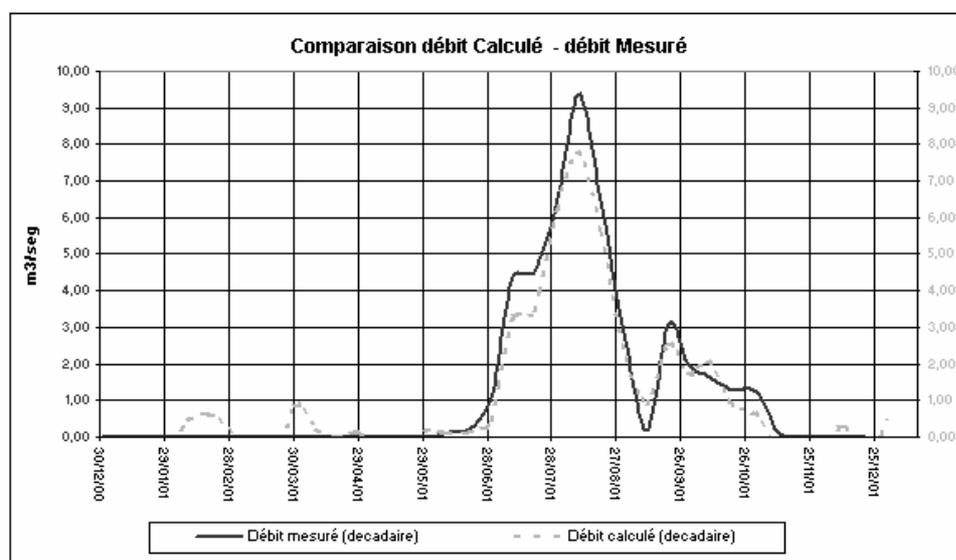


Figure 23 : Résultat du bilan du lac Paron pour l'année 2001 avec un K_r de 0,3 et une ligne d'équilibre des glaciers à 5000 mètres.

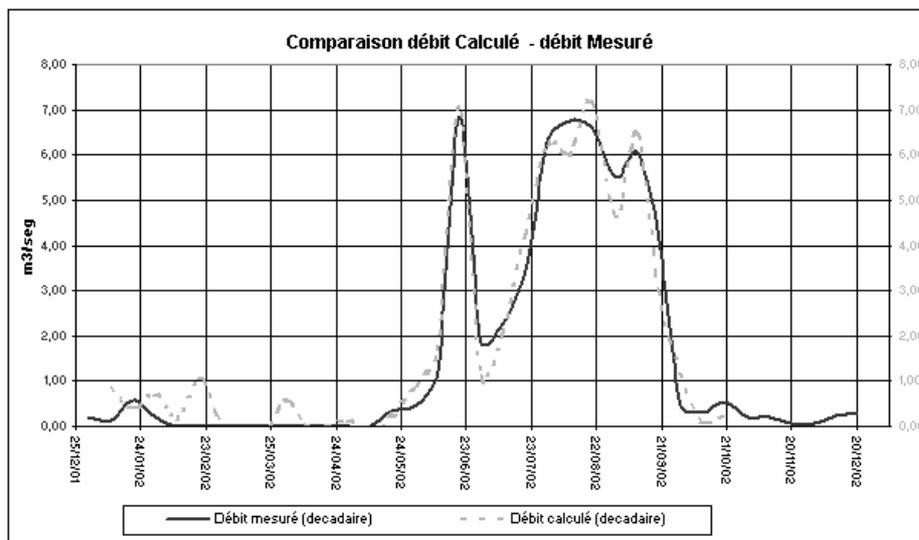


Figure 24 : Résultat du bilan du Lac Paron pour l'année 2002 avec un Kr de 0,3 et une ligne d'équilibre des glaciers à 5000 mètres.

La figure 22 permet seulement des comparaisons en début de saison avant l'ouverture de la vanne et lors des dernières semaines de la campagne de lâchers avant sa fermeture jusqu'à l'année suivante.

Les figures 24 et 23 expriment la relation entre le débit calculé et le débit observé pour les années 2002 et 2001. On note des problèmes au début des deux années : il y a des pics de débit calculé alors que la vanne est fermée.

On observe pour finir qu'en admettant que la ligne d'équilibre des glaciers est à 5000 mètres, la surface d'ablation glaciaire dans le bassin du lac Paron n'est que d'un km² (12% de toute la surface glaciaire du bassin du lac Paron), ce qui paraît peu conforme à la réalité.

- **Ligne d'équilibre des glaciers à 5200 mètres**

Dans le tableau 8, on trouve les résultats obtenus avec l'hypothèse que la ligne d'équilibre des glaciers se trouve à 5200 mètres d'altitude.

Kr	2001		2002	
	RAP	NASH	RAP	NASH
0,20	0,84	0,93	1,11	0,95
0,25	0,91	0,93	1,14	0,94
0,30	0,98	0,93	1,16	0,93
0,35	1,05	0,92	1,20	0,91
0,40	1,12	0,90	1,30	0,88

Tableau 8 : Résultats des critères (RAP et NASH) du débit du sortie du lac Paron avec différents coefficients de ruissellements et la ligne d'équilibre des glaciers à 5200 mètres d'altitude.

Avec une ligne d'équilibre des glaciers à 5200 mètres d'altitude pour l'année 2001 , nous pouvons voir que les meilleures réponses pour le RAP sont obtenues avec Kr

compris entre 0,30 et 0,35. Au contraire en 2002 les mêmes valeurs de K_r donnent des réponses trop élevées. En 2002 la meilleure réponse du coefficient RAP a été obtenue avec un K_r de 0,2.

De manière générale pour NASH, les réponses sur les deux années sont très bonnes. En 2001 le coefficient varie entre 0,93 et 0,90 ; mais les meilleures réponses sont données pour des K_r entre 0,2 et 0,3. En 2002 le coefficient de NASH présente la meilleure réponse lorsque le K_r est le plus petit dans l'intervalle 0,2 - 0,4.

Avec la précision que nous avons adoptée, pour une ligne d'équilibre des glaciers à 5200 mètres d'altitude, le **K_r de 0,2** est le plus acceptable selon les critères NASH et RAP.

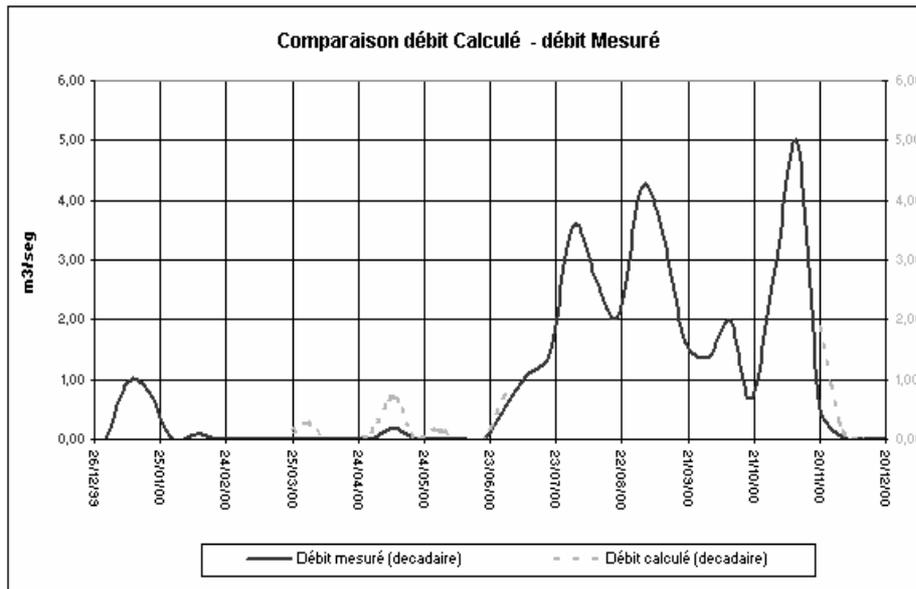


Figure 25 : Résultat du bilan du lac Paron pour l'année 2000 avec un K_r de 0,2 et une ligne d'équilibre des glaciers à 5200 mètres.

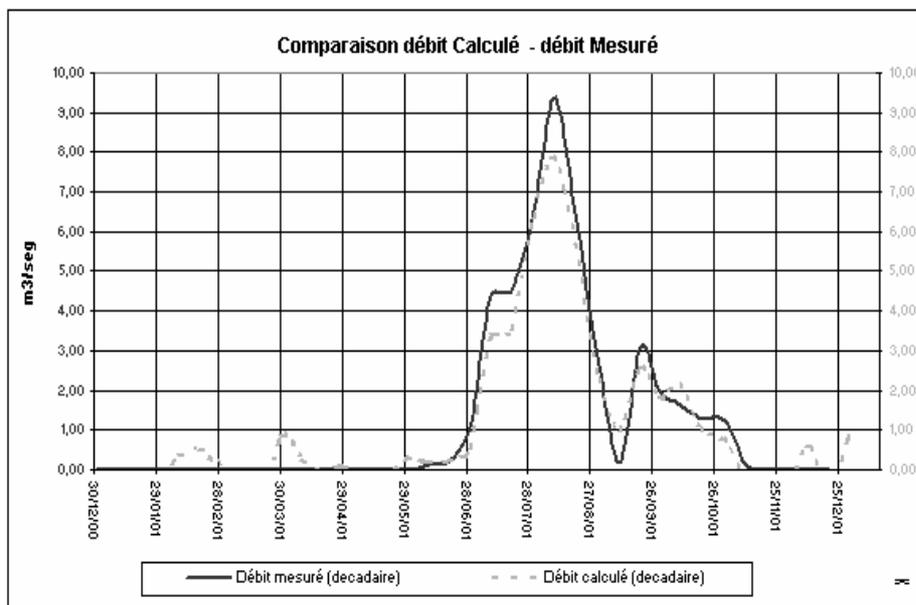


Figure 26 : Résultat du bilan du lac Paron pour l'année 2001 avec un K_r de 0,2 et une ligne d'équilibre des glaciers à 5200 mètres.

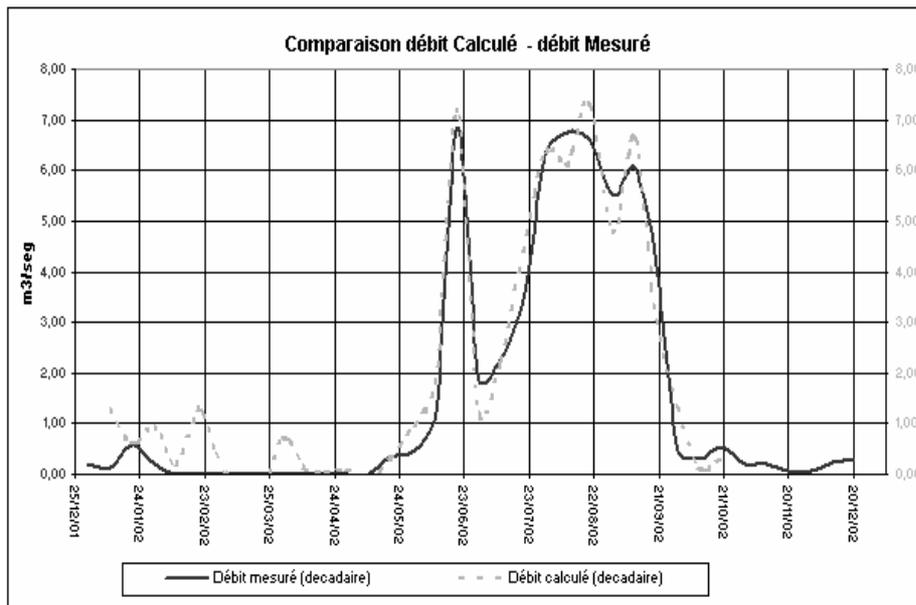


Figure 27 : Résultat du bilan du lac Paron pour l'année 2002 avec un Kr de 0,2 et une ligne d'équilibre des glaciers à 5200 mètres.

La figure 25 présente les correspondances pour l'année 2000, lorsque les données existent.

Sur les figures 26 et 27, on peut voir la réponse du modèle de bilan hydrique avec une ligne d'équilibre des glaciers à 5200 mètres d'altitude pour un Kr de 0,2.

En 2001, la figure 26 présente le même problème que sur la figure 22. Le début de l'année présente des pics quand la vanne est fermée. Pour l'autre partie de l'année la correspondance visuelle est bonne.

La figure 27 pour l'année 2002, présente la comparaison entre les deux débits. Nous pouvons voir qu'au début de l'année, il y a un pic de débit calculé, alors que la vanne est fermée. Pendant les mois d'ouvertures de la vanne (juin à décembre) les correspondances sont bonnes.

En admettant une ligne d'équilibre des glaciers à 5200 mètres, la surface d'ablation dans le bassin du lac Paron est de 4,1 km² (33.17% de toute la surface glaciaire du bassin du lac Paron). Dans les études sur le glacier Zongo (environ 1500 km au sud-est), les chercheurs de l'IRD ont estimé que sur la période du 1991 à 2000, la ligne d'équilibre s'établit en moyenne à 5240 mètres et que la surface d'ablation correspond à 33% de la surface glaciaire (Francou, 2003, commentaire pers.). On peut donc admettre que l'hypothèse d'une ligne d'équilibre moyenne à 5200 mètres est assez proche de la réalité pour la vallée Paron.

Le passage de la position de la ligne d'équilibre de 5000 mètres à 5200 mètres représente une augmentation de 3,1 km² de la surface d'ablation glaciaire dans ce bassin.

6.1.2. Lac Arteson

Situé à l'amont du lac Paron, ce lac présente la caractéristique d'avoir une surface glaciaire équivalente à 74% de toute la surface de son bassin versant. De plus, son comportement n'est pas altéré par les activités humaines. Nous avons analysé sur ce bassin le ruissellement sur les versants non englacés selon les deux paramètres utilisés dans le modèle de bilan du lac Paron.

L'écoulement non glaciaire est donné par le coefficient de ruissellement (K_r). Les deux valeurs de K_r qui ont été testées sont $K_r = 0,2$ avec une ligne d'équilibre des glaciers à 5200 mètres et $K_r=0,3$ avec une ligne d'équilibre des glaciers à 5000 mètres. Sur la figure 28, on peut voir le comportement du ruissellement non glaciaire entre 2000 et 2002 pour ces deux situations.

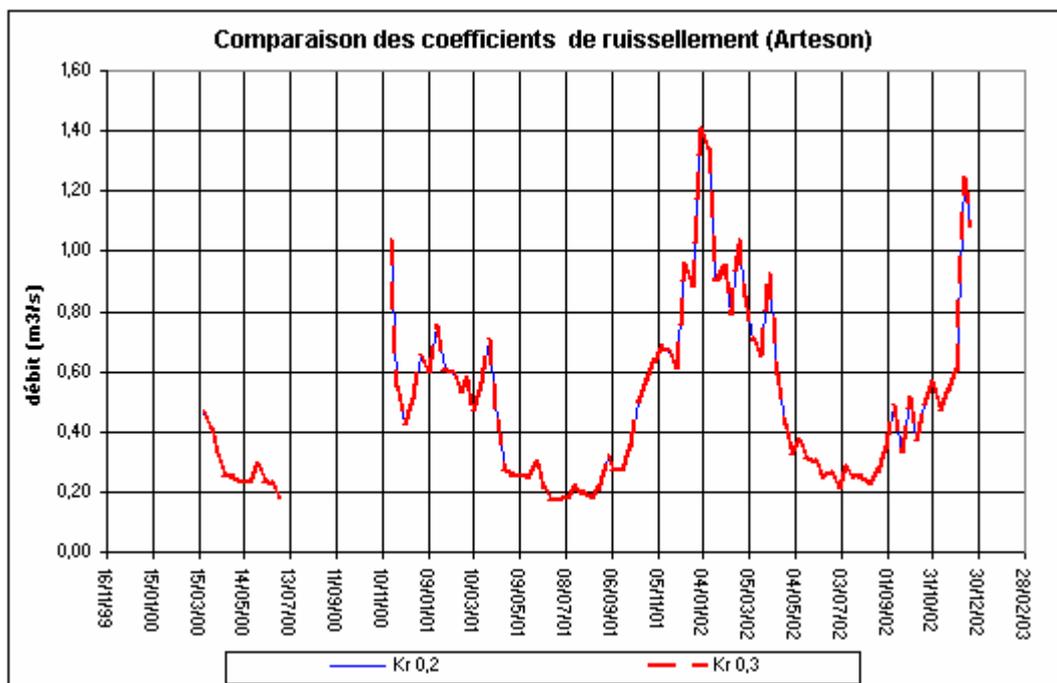


Figure 28 : Comparaison entre les débits de ruissellement non glaciaire sous deux hypothèses de ruissellement des versants non englacés ($K_r : 0,2$ et $0,3$) sur la période 2000-2002.

Sur la figure 28, on note qu'il n'y a pratiquement pas de différence sur l'écoulement des zones non englacées entre les deux hypothèses. Cela est dû à la très faible surface non englacée de ce bassin.

Sur cette figure aussi, on constate que le principal élément du bilan dans le remplissage de ce lac vient de l'apport de la fonte des glaciers.

Il est donc intéressant d'étudier pour le bassin d'Arteson, le débit spécifique de fonte provenant de la zone d'ablation des glaciers. En effet, c'est sur l'hypothèse de l'invariance de ce débit spécifique que nous avons calé le modèle de bilan sur le lac Paron, en faisant varier les surfaces concernées selon la position de la ligne d'équilibre.

Sur la figure 29 nous pouvons voir la variation du débit spécifique entre 2000 et 2002 pour le lac Arteson pour les deux positions de la ligne d'équilibre des glaciers.

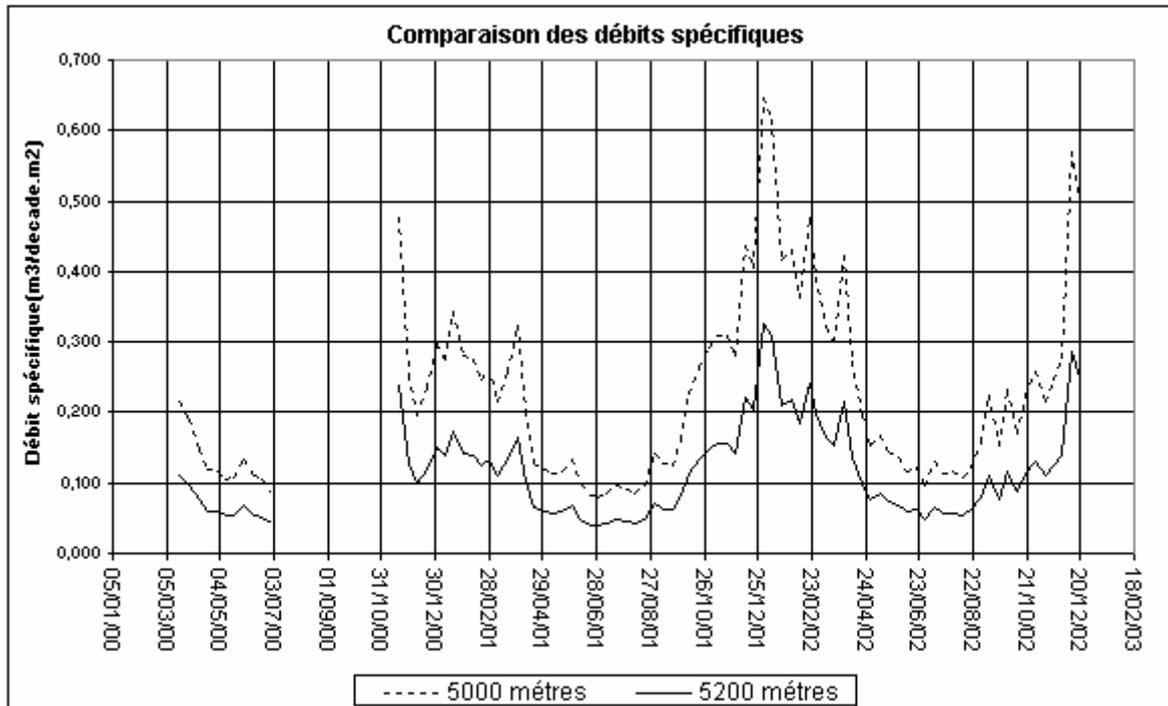


Figure 29 : Comparaison du débit spécifique du la fonte glacier pour deux positions de la ligne d'équilibre des glaciers (5200 et 5000 mètres d'altitude) sur le bassin du lac Arteson.

Nous pouvons voir sur cette figure 29 que le débit spécifique change selon la position de la ligne d'équilibre, dans un rapport inversement proportionnel aux surfaces d'ablation des glaciers déterminées par cette position :

Lorsque la ligne d'équilibre se trouve à 5000 mètres d'altitude la surface glacier d'ablation est 1,87 km² (30% de toute la surface glaciaire du bassin du lac Arteson et 22,3% de toute la surface du bassin du lac Arteson). Quand la ligne se trouve à 5200 mètres d'altitude la surface d'ablation est 3,75 km² (60,3% de toute la surface glaciaire du bassin du lac Arteson et 44,7% de toute la surface du bassin du lac Arteson).

Le changement de position de la ligne d'équilibre de 5000 mètres à 5200 mètres glaciaire représente une augmentation de 1,88 km² de la surface d'ablation.

Dans les deux petits bassins la variation de la position de la ligne d'équilibre influence le débit spécifique. Dans le bassin du lac Arteson lorsque la ligne d'équilibre est plus haute, le débit spécifique est plus petit. Dans le bassin du lac Paron pour lequel on a appliqué le débit spécifique du lac Arteson, lorsque la ligne d'équilibre est plus haute, l'écoulement glaciaire est plus important.

Après de cette analyse, nous pouvons voir que le rapport de la surface d'ablation des glaciers par rapport à la surface totale change beaucoup dans les deux petits bassins. Par conséquent, l'hypothèse d'un débit spécifique de fonte constant est sans doute trop grossière pour décrire complètement le bilan de la vallée Paron. Mais pour l'instant, nous n'avons pas d'information permettant de l'améliorer.

6.2. Discussion

6.2.1. Bilan avec des données insuffisantes

- Corrections des données

Un des premiers problèmes rencontrés dans la représentation du bilan est la qualité des données météorologiques, d'une part, et hydrauliques (lac Paron) d'autre part. La station de mesure du débit du lac Paron présente beaucoup d'incohérences entre le débit annoncé par l'opérateur et la variation observée du niveau du lac.

Sur la figure 30 nous pouvons voir une représentation de ce type de problème.

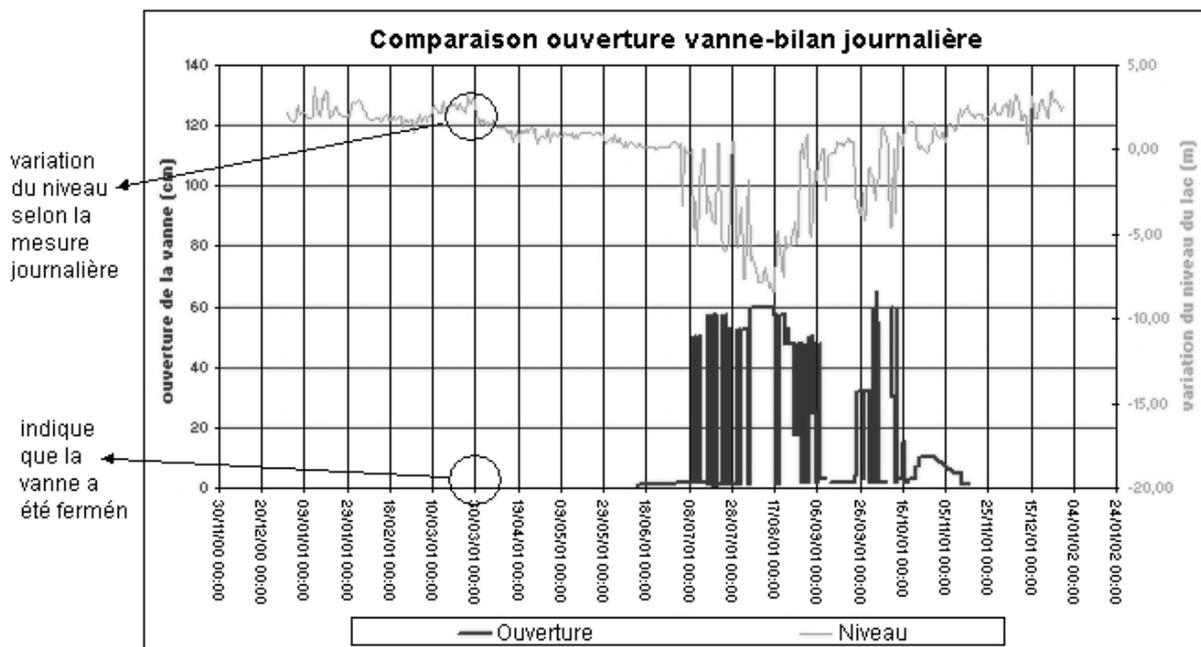


Figure 30 : Exemple d'incohérence des données.

Sur la figure 30 on peut voir un exemple de la représentation de l'incohérence des données de la vanne de Paron : alors que la vanne est fermée, on peut voir que la lecture de la variation journalière du niveau du lac indique une perte d'eau.

Pour expliquer ce type de problème, on peut formuler des hypothèses comme : l'opérateur a oublié de noter l'ouverture de la vanne, ou : les observations de variation de niveau du lac sont mauvaises. Sur les figures 22 et 24, on note voir qu'il y a une réponse du bilan du lac Paron à ce problème.

Ce type de problème se présente généralement lorsque la vanne est fermée (en début d'année pendant la période des pluies). Pour la reconstitution des données avec ce type de problème, il est nécessaire d'allonger la série des données hydrauliques.

Il faut aussi tenir compte pour le lac Paron du fait que l'équation de débit de la vanne a été reconstituée avec un numéro insuffisant de points de référence.

- **Quantité de données**

Un autre problème que nous avons rencontré est la quantité de données hydrométéorologiques. Sur le bassin Paron, le réseau hydrométéorologique est récent et insuffisant :

- La couverture pluviométrique existe seulement pour le lac Paron (à coté de l'exutoire) avec un seul pluviomètre. Pour le lac Arteson, il n'y a pas de mesure de précipitation.

- Le contrôle du débit du lac Arteson a commencé en 1996, mais avec beaucoup de lacunes lors des quatre premières années.

- Sur le bassin Paron, il n'y a pas de donnée d'évaporation. Nous avons utilisé des données d'autres lacs d'altitude dans des bassins voisins (en élargissant jusqu'au Lac Titicaca à plus de 1000 km au sud-est !).

- **Ligne d'équilibre des glaciers**

Pour simplifier les calculs de l'écoulement glaciaire nous avons assimilé la ligne d'équilibre des glaciers à une courbe de niveau. Dans la réalité cette ligne change selon des conditions climatiques. Dans l'étude, le bilan hydrique a été évalué pour les années 2000, 2001 et 2002 au cours desquelles il n'y a pas eu d'événement climatique exceptionnel comme « El Niño » qui peut occasionner une remontée de la ligne d'équilibre jusqu'à 5600 mètres d'altitude. En année El Niño, les débits des écoulements glaciaires augmentent significativement, ainsi que les écoulements non glaciaires.

6.2. Télédétection

Dans ce mémoire, la détermination des surfaces glaciaires est une étape importante. Nous avons utilisé des images fournies par le satellite SPOT dont la taille de pixels est de 20 x 20 mètres. Pour des surfaces de glaciers petites, cette dimension génère des erreurs sur les limites. Autre problème que nous avons trouvé, est la réponse radiométrique de différents éléments en ombre et la réponse des petits miroirs d'eau qui ont des réponses radiométriques pareils au front glacier.

Plus important sans doute sont les erreurs liées au calcul des surfaces entre courbes de niveaux, lesquelles ont été construites à partir d'un MNT dont la tolérance altimétrique est de 10 mètres et dont les procédures d'interpolation entre maille ne sont pas connues.

Ces différents facteurs contribuent à augmenter les erreurs pour l'identification et la quantification du bilan hydrique dans le système lacustre de la vallée Paron.

7. CONCLUSIONS

Ce travail de DEA a permis de préciser un thème encore peu abordé dans les Andes Péruviennes, celui de la dynamique d'un système lacustre de haute montagne.

Le bassin du Rio Santa présente une série de petits bassins versants d'origine glaciaires, parmi lesquels le bassin Paron présente la plus grande surface de glacier.

Nous avons fait une première approximation grossière du fonctionnement hydraulique (bassin du lac Paron) et du fonctionnement hydrologique (bassin du lac Arteson) en formulant des hypothèses sur des coefficients d'écoulements vraisemblables et en construisant une représentation du bilan hydrique du système lacustre Paron. Les coefficients de ruissellement selon les hypothèses de la ligne d'équilibre des glaciers les plus acceptables sont présentés dans le tableau 9 :

Position de la ligne d'équilibre du glacier (mètres d'altitude)	Coefficient de ruissellement (sans dimensions)
5200	0,2
5000	0,3

Tableau 9 : Coefficients de ruissellement et position de la ligne d'équilibre pour le système lacustre.

Les valeurs des positions de la ligne d'équilibre des glaciers ne prétendent pas être définitives parce que leur position change selon les conditions climatiques de l'année et la date. Les coefficients de ruissellement ne sont pas définitifs non plus ; ce sont simplement les meilleurs paramètres que nous avons trouvés pour un calage satisfaisant du modèle de bilan. Les deux réponses possibles sont à relier à l'insuffisance des données d'observation.

Le modèle de bilan hydrique mis au point, encore en partie conceptuel, permet en premier lieu, de calculer de façon grossière, mais réaliste, les volumes d'eau issus de la fonte du glacier.

La représentation de l'étude du remplissage des deux lacs donne des indications sur le comportement des bassins possédant une grande surface glaciaire : pour le bassin du lac Arteson, on peut voir que l'influence de la pluie est minimale dans le bilan, le principal apport provenant de la fonte des glaciers. Dans le bassin du lac Paron, on note une présence plus importante des précipitations sur les versants non englacés dans le bilan en sus des apports dû à la fonte des glaciers et au débordement du lac Arteson.

Avec la réalisation de ce travail , nous avons identifié les informations les plus pertinentes pour l'étude du remplissage des lacs de haute montagne dans le bassin du Rio Santa.

Pour mieux connaître le comportement de ces bassins, une étude plus approfondie de la vallée Paron, basée sur une période de mesures plus longue, avec la reconstitution des données pour tout type d'événement climatique (ENSO), une correction plus rigoureuse des données et mesures de terrain (principalement sur le système hydraulique), nous permettrait d'améliorer sensiblement les approximations du bilan. La recherche de relations avec les autres bassins versants glaciaires conduirait à une étude plus vaste dans tout le bassin du Rio Santa.

Dans ce type de recherche, il est important d'insister sur l'importance de la télédétection et des systèmes d'information géographique, comme outils puissants pour la détermination des surfaces glaciaires, mais aussi pour l'évaluation d'autres paramètres comme la densité de la neige. Dans le présent travail, nous avons été limité dans l'évaluation des limites des glaciers à cause de la taille du pixel, mais avec les progrès technologiques et les nouveaux satellites, ce problème va disparaître peu à peu.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMBROISE, B., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant, HGA, 200 pp.
- BACCI, J., 1997. Modelización hidroluviométrica: del modelo global en un modelo distribuido. Aplicación en la cuenca vertiente del Paute (Ecuador); INSEC, 63 pp.
- BOSQUE, J., 1992, Sistema de Información Geográfica, RIALP, 451 pp.
- COSTE, S., 1998, Inventaire des mares et des ravines par télédétection pour l'élaboration d'un modèle hydrologique en zone sahélienne, Mémoire de DEA, U. Louis Pasteur, 99 pp.
- CABALLERO, Y., 2001. Modélisation des écoulements pluvio-nivo-glaciaires en contexte de haute montagne Tropicale, thèse de doctorat, U. Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 200 pp.
- CABALLERO, Y., 2001. Modélisation intégrée d'un système bassin versant aménagé de la cordillère des Andes (Vallée du Zongo-Bolivie), U. Montpellier II, Montpellier, 56 pp.
- CHUVIECO, E. , 1996 Fundamentos de Teledetección Espacial, RIALP, 568 pp.
- FAVIER, V., 2001, Etude hydrologique du bassin versant du glacier 15 de l'Antizana (0°25' S, 78°09'O) - Première modélisation hydrologique à partir du bilan d'énergie et une approche précipitation/débit, Mémoire de DEA, U. Montpellier II, Montpellier, 59 pp.
- FRANCOU, B., 1993, Hautes montagnes - passion d'explorations, MASSON, 198 pp.
- FRANCOU, B., RIBSTEIN, P., POUYAUD, B., 1997, La fonte des glaciers tropicaux, La Recherche, 34-37 pp.
- HYDROLOGIE SPATIALISEE OUTILS & APPLICATIONS, 2002, CEMAGREF, Montpellier.
- KASER, G. and OSMASTON, H., 1996. Tropical glaciers. Cambridge University Press, Cambridge, 195 pp.
- LEBLANC, J.-M., 2001. Dynamique de la couverture neigeuse dans les Andes Tropicales, Mémoire de DEA, U. Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 52 pp.
- PORTOCARRERO, C., 1995, Retroceso de glaciares en el Perú: consecuencias sobre los recursos hídricos y los riesgos geodinámicos, Bulletin de l'institut français d'études andines, 697-706 pp.

- POUYAUD, B., YERREN, J., ZAPATA, M. et Al, 2003, Glaciares y Recursos Hídricos en la cuenca del río Santa, 63 pp.
- PROYECTO ESPECIAL LAGO TITICACA, 1993, Mission d'évaluation sur la prise en compte de l'évaporation, HYDRO CONSUL international, 41 pp.
- SICART , J.E., 2001. Contribution à l'étude des flux d'énergie, du bilan de masse, du débit de fonte d'un glacier tropical : Le Zongo, Bolivie, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie CURIE, Paris, 324 pp.
- SICART , J.E., WAGNON , P. and RIBSTEIN, P., 2003. On the relation between meteorological conditions and the melting of outer tropic's glaciers. Journal of (Geophysical Research, submitted.
- TARDY, Y., 1986, Le cycle de l'eau, éditorial MASSON, 338 pp.
- VIGNON , F. , 2002. Glaciares y recursos hídricos en el valle alto del río Santa, Thèse de DED, U. Pierre et Marie Curie, 61 pp.
- WAGNON , P., 1999. Analyse du bilan d'énergie d'un glacier tropical ,application à la relation glacier-climat, thèse de doctorat, U. Joseph Fourier, Grenoble, 199 pp.

Bilan hydrique d'un système lacustre de haute montagne : le bassin Paron (Cordillère Blanche – Pérou)

Résumé

La Cordillère Blanche borde le versant ouest du Rio Santa dans les Andes Tropicales au Pérou. L'eau du Rio Santa est actuellement utilisée pour la production électrique et l'agriculture. Dans le futur il est envisagé de développer l'exploitation de ce cours d'eau pour de nouveaux projets d'irrigation dans le nord du Pérou.

La Cordillère Blanche présente un ensemble de petits bassins versants alimentés par des glaciers. Ils constituent les principales sources d'eau en saison sèche et contiennent souvent des lacs qui stockent l'eau en saison des pluies et la fonte des glaciers pendant toute l'année.

Parmi ces petits bassins versants, le bassin Paron est un système lacustre contenant deux lacs, le premier (lac Arteson) avec un fonctionnement naturel et le second (lac Paron) avec une régulation du niveau de l'eau pour la production électrique, ainsi qu'à des fins de protection civile (prévention des risques de débordement).

L'étude de ce système consiste à établir une quantification des différentes composantes du bilan hydrique, ainsi que d'identifier les paramètres physiques les plus pertinents pour caractériser les bassins glaciaires de haute montagne.

Ce mémoire est un point de départ pour une analyse plus complexe de la dynamique hydrique de ce type de bassins versants et pour évaluer la variabilité des ressources en eau dans le bassin du Rio Santa.

Mots clés : Cordillère Blanche, système lacustre , glaciers tropicaux, bilan de masse, aménagement hydraulique.