



UNIVERSITE MONTPELLIER II
UFR SCIENCES

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT
UR Great Ice / Maison des Sciences de l'Eau – Montpellier
Département Milieux et Environnement de l'IRD

Année 2001

Dynamique de la couverture neigieuse dans les Andes Tropicales

Vallée du Rio Zongo, Bolivie

Jean-Marc LEBLANC

Mémoire de DEA de l'Université Montpellier II

Date de la soutenance : 2 juillet 2001

Directeur de Mémoire :

Pierre Chevallier

JURY

M. Michel DESBORDES
M. Eric CADIER
M. Christian SALLES
M. Alain DELACOURT
M. Pierre CHEVALLIER

Remerciements

Je tiens à remercier M. Desbordes de m'avoir accueilli dans le DEA *Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental* et de m'avoir ainsi permis de réaliser ce stage.

Je remercie sincèrement Pierre Chevallier, mon directeur de stage, pour la grande disponibilité dont il a fait preuve tout au long de ce travail, pour ses conseils avisés et pour les excellentes conditions de travail qu'il m'a donné pendant ces six mois. Je le remercie également de m'avoir fait confiance, quelques mois auparavant, pour le poste de CSN à La Paz au sein de NGT.

Je remercie également Pierre Ribstein pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail, Henri Laurent pour m'avoir permis d'utiliser ses données de tracking. Yves Arnaud, Hélène Niel, Yvan Caballero et Vincent Mathon m'ont également apporté leurs précieux conseils et leur soutien.

Mes différents collègues de bureau (Sandra, Fabienne, José, Maryline et Patrick) ont contribué, par leur bonne humeur, au bon déroulement de ce stage.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| LISTE DES ACRONYMES | IV |
| LISTE DES FIGURES | V |
| LISTES DES TABLEAUX..... | VII |
| INTRODUCTION | 1 |
| 1. OBJECTIFS | 2 |
| 1.1. POSITION DU PROBLEME | 2 |
| 1.1.1. <i>Les glaciers, marqueurs des changements climatiques</i> | 2 |
| 1.1.2. <i>Les glaciers, "objets hydrologiques"</i> | 2 |
| 1.1.3. <i>Etude de la couverture neigeuse</i> | 2 |
| 1.1.4. <i>Objectifs de notre étude</i> | 2 |
| 1.2. INSCRIPTION DANS LE CADRE D'UN PROJET DU PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE..... | 3 |
| 2. DESCRIPTION DU MILIEU D'ETUDE..... | 4 |
| 2.1. MILIEU PHYSIQUE..... | 4 |
| 2.1.1. <i>Situation géographique</i> | 4 |
| 2.1.2. <i>Saisonnalité du climat</i> | 6 |
| 2.2. CONSIDERATIONS SUR LE CLIMAT EN HAUTE MONTAGNE TROPICALE | 7 |
| 2.2.1. <i>Spécificités du contexte tropical</i> | 7 |
| 2.2.2. <i>Altitude</i> | 7 |
| 2.2.3. <i>Topographie</i> | 8 |
| 2.2.4. <i>Les systèmes précipitants</i> | 8 |
| 2.2.5. <i>Pluie ou neige?</i> | 9 |
| 2.3. CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA NEIGE..... | 12 |
| 2.3.1. <i>Recherche des conditions climatiques fixant la limite pluie neige</i> | 12 |
| 2.3.2. <i>Modélisation de la dynamique de la couverture neigeuse</i> | 15 |
| CE QU'IL FAUT RETENIR..... | 17 |
| 3. DONNEES ET MESURES..... | 18 |
| 3.1. DONNEES METEOROLOGIQUES | 18 |
| 3.1.1. <i>Observations visuelles des précipitations</i> | 18 |
| 3.1.2. <i>Station pluviométrique</i> | 20 |
| 3.1.3. <i>Station météorologique</i> | 21 |
| 3.2. DONNEES SATELLITALES | 22 |
| 3.2.1. <i>Applications de la Télédétection à l'étude de la neige</i> | 22 |
| 3.2.2. <i>Objectifs</i> | 22 |
| CE QU'IL FAUT RETENIR..... | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 4. RESULTATS ET DISCUSSION..... | 25 |
| 4.1. CONDITIONS CLIMATIQUES FIXANT LA LIMITE PLUIE NEIGE | 25 |
| 4.1.1. <i>Individualisation et caractérisation d'événements</i> | 25 |
| 4.1.2. <i>Analyse statistique, décembre 1999 / mars 2000</i> | 25 |
| 4.1.3. <i>Analyse statistique janvier / février 1999</i> | 34 |
| 4.1.4. <i>Discussion</i> | 39 |
| 4.2. SYSTEMES NUAGEUX ET PRECIPITATIONS NEIGEUSES | 41 |
| 4.2.1. <i>Résultats</i> | 41 |
| 4.2.2. <i>Discussion</i> | 45 |
| CE QU'IL FAUT RETENIR..... | 47 |
| CONCLUSION..... | 48 |
| BIBLIOGRAPHIE | 49 |

Résumé

Dans les Andes Tropicales boliviennes, le programme Great Ice de l'IRD étudie depuis 1991 au travers d'un glacier expérimental, le glacier Zongo (4900-6088 m, Cordillère Royale), les changements climatiques et la ressource en eau. Le dispositif de mesures mis en place sur ce glacier a été élargi à partir de 1998 pour s'intéresser à l'ensemble du cycle hydrologique dans la vallée à l'aval. Dans le cadre d'un projet validé par le Programme National de Recherche en Hydrologie, une expérimentation devrait préciser dans les prochains mois (saison humide 2001-2002) la dynamique de la couverture neigeuse hors des zones englacées, thème encore peu abordé dans cette zone.

Dans ce mémoire, il est proposé un état des connaissances sur les conditions climatiques susceptibles de caractériser la nature solide ou liquide des précipitations. A partir de mesures météorologiques et d'observations qualitatives de terrain, on essaie d'établir les caractéristiques climatiques au sol permettant de discriminer le type de précipitations : pluie ou neige. En s'attachant plus particulièrement à la température, on délimite ainsi des domaines d'existence pour les précipitations. Dans un deuxième temps, on utilise l'information satellitale pour suivre les amas nuageux en croisant la signature spectrale du sommet des nuages à 235°K, avec l'information disponible au sol. A travers cette analyse, il s'agit d'identifier les événements responsables d'un type de précipitation selon le lieu de formation des amas nuageux.

Mots clefs

Andes Tropicales, Bolivie, type de précipitations, pluie, neige, température critique, dynamique de la couverture neigeuse, suivi des amas nuageux

Liste des acronymes

| | |
|------------|--|
| ABTEMA | Association Boliviana de Teledeteccion para el Medio Ambiente |
| AVHRR | Advanced Very High Resolution Radiometers |
| CEN | Centre d'Etudes de la Neige |
| CGM, MGC | Modèle de Circulation Général |
| COBEE | Compagnie Bolivienne d'Energie Electrique S.A |
| CPTEC | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Brésil |
| CROCUS | Modèle d'évolution du manteau neigeux du CEN |
| GOES | Geostationary Operational Environmental Satellite |
| Great Ice | Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales – Indicateurs Climatiques et Environnementaux |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brésil |
| IRD | Institut de Recherche pour le Développement (ex-ORSTOM) |
| ISBA | Interaction Sol – Biosphère – Atmosphère (Modèle) |
| LBA | Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia |
| NGT | Neige et Glaciers Tropicaux |
| NOAA | National Oceans and Atmosphere Administration |
| PNRH | Programme National de Recherche en Hydrologie |
| ZCIT, ICTZ | Zone de Convergence Inter Tropicale |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Carte de la Bolivie (d'après Franqueville, 2000)..... | 4 |
| Figure 2 : Localisation du bassin versant du Zongo et cadre géomorphologique (carte extraite du SIG Arc View IRD, 2000)..... | 5 |
| Figure 3 : Schéma du système hydraulique de la vallée du Zongo (d'après Reinhardt, 1997). | 6 |
| Figure 4 : Structure atmosphérique de température associée aux principaux types de précipitation | 10 |
| Figure 5 : Probabilité d'occurrence de la pluie ou de la neige pour chaque degré Fahrenheit (d'après Auer, 1974). | 13 |
| Figure 6 : Massif du Huayna Potosi, Cordillère Royale. (Photo : Leblanc J.M)..... | 18 |
| Figure 7 : Station météorologique automatique sur le glacier du Zongo (5150 m). (Photo : Leblanc J.M). | 19 |
| Figure 8 : Probabilité de précipitations non interceptées par un pluviomètre en fonction de la vitesse du vent et du type de pluviomètre. (d'après Larson et Peck, 1974). | 21 |
| Figure 9 : Températures moyennes, minimales et maximales des événements pluie et neige. 01/12/99 - 31/12/00, Plataforma (4750 m)..... | 27 |
| Figure 10 : Histogramme des fréquences des températures moyennes des événements regroupés par tranches de 1°C. 01/12/99 - 31/03/00, Plataforma. | 28 |
| Figure 11 : Fréquence relatives cumulées des températures classées pour les événements pluie et neige. 01/12/99 - 31/03/00, Plataforma (4750 m)..... | 29 |
| Figure 12 : Température moyenne demi-heure lorsque l'on observe une précipitation de type pluie ou neige. 01/12/99– 31/03/00, Plataforma. | 31 |
| Figure 13 : Histogramme représentant la fréquence de pluie ou de neige observée par classe de température. 01/12/99 – 31/03/00, Plataforma | 31 |
| Figure 14 : Fréquences relatives cumulées des températures classées pour les enregistrements pluie et neige. 01/12/99 – 31/03/00, Plataforma..... | 32 |
| Figure 15 : Fréquence relative d'occurrence de pluie ou de neige par classe de température d'intervalle 1°C. 01/12/99 - 31/03/00, Plataforma (4750 m)..... | 33 |
| Figure 16 : Température moyenne demi-heure lorsque l'on observe une précipitation de type pluie ou neige. 11/01/99 – 28/02/99, Plataforma. | 37 |
| Figure 17 : Histogramme représentant la fréquence de pluie ou de neige observée par classe de température. 11/01/99 – 28/02/99, Plataforma..... | 37 |
| Figure 18 : Températures moyennes demi-horaires classées. 11/01/99 – 28/02/99, Plataforma. | 38 |
| Figure 19 : Fréquence relative d'occurrence de pluie ou de neige par classe de température d'intervalle 1°C. 11/01/99 - 28/02/99, Plataforma (4750 m)..... | 39 |
| Figure 20 : Répartition des pluies et du rayonnement solaire incident au cours de la journée. Cumuls (précipitations) et moyennes (rayonnement) demi-horaires sur la période du 01/12/99 au 31/03/00. Plataforma (4830 m) et Liviñosa (4000 m) | 40 |
| Figure 21 : Précipitations journalières à la Plataforma et nombre moyen journalier de pixels détectés sur le degré carré. 11/01/99 - 28/02/99..... | 42 |
| Figure 22 : Nombre moyen de pixels, pour chaque demi-heure de la journée, ayant touché le degré carré et donné des précipitations. Période du 11/01/99 au 28/02/99, Plataforma. | 43 |
| Figures 23 : Position des lieux de naissance et trajectoire des amas nuageux ayant touché le degré carré et donné des précipitations à la Plataforma. Période du 11/01/99 au 28/02/99..... | 44 |

Figures 24 : Position moyenne (gauche) et successive (droite) des amas nuageux ayant intercepté le degré carré et donné une précipitation caractérisée au sol. 11/01/99 – 28/02/99..... 45

Listes des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Caractéristiques climatiques des précipitations observées entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma. | 25 |
| Tableau 2 : Caractéristiques climatiques des pluies observées entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma. | 26 |
| Tableau 3 : Caractéristiques climatiques des chutes de neige observées entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma. | 26 |
| Tableau 4 : Enregistrements (moyennes demi-horaires) pour lesquels on observe une précipitation entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma. | 30 |
| Tableau 5 : Enregistrements des moyennes demi-horaires pour lesquels on observe de la pluie entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma. | 30 |
| Tableau 6 : Enregistrements des moyennes demi-horaires pour lesquels on observe de la neige entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma. | 30 |
| Tableau 7 : Ensemble des événements "pluvieux" individualisés. 11/01/99 - 28/02/99, Plataforma. | 34 |
| Tableau 8 : Evénements pluie caractérisés. 11/01/99 - 28/02/99, Plataforma. | 34 |
| Tableau 9 : Evénements neige caractérisés. 11/01/99 - 28/02/99, Plataforma. | 35 |
| Tableau 10 : Enregistrements (moyennes demi-horaires) pour lesquels on observe une précipitation entre le 11/01/99 et le 28/02/99. | 36 |
| Tableau 11 : Enregistrements (moyennes demi-horaires) pour lesquels on observe de la pluie entre le 11/01/99 et le 28/02/99, Plataforma. | 36 |
| Tableau 12 : Enregistrements (moyennes demi-horaires) pour lesquels on observe de la neige entre le 11/01/99 et le 28/02/99, Plataforma. | 36 |

Introduction

Depuis 1991, le programme Neige et Glaciers Tropicaux de l'IRD, qui s'est constitué en janvier 2001 en unité de recherche sous le nom de Great Ice (Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales – Indicateurs Climatiques et Environnementaux), s'intéresse à l'hydrologie des Andes Tropicales et à l'impact de la variabilité climatique. Dans ces zones, une partie de la ressource en eau est d'origine glaciaire, une autre est constituée par des précipitations neigeuses sur les sommets, neigeuses ou pluviales dans les hautes vallées. La variabilité climatique, et plus particulièrement l'augmentation de la température, a pour conséquence une modification du régime de précipitation, transformant à certaines altitudes élevées les chutes de neige en averses pluvieuses. Les conséquences hydrologiques de cette modification peuvent être importantes et remettre en question les aménagements hydrauliques de ces vallées pour l'alimentation en eau potable des villes, la production énergétique ou la petite irrigation de montagne.

Jusqu'à présent, les travaux réalisés dans cette zone se sont peu intéressés à la nature des précipitations et à la dynamique de la couverture neigeuse hors des zones englacées. Cependant, pour appliquer les modèles pluie-débits existants influencés par la neige, la connaissance d'une température seuil au sol est nécessaire pour caractériser la nature solide ou liquide de la précipitation.

Deux directions complémentaires pour aborder cette nouvelle thématique « neige hors des zones englacées » ont été suivies dans ce mémoire de DEA. Un premier dégrossissage de cette étude est proposé afin, d'une part, d'établir plus finement la température critique pluie/neige et, d'autre part, d'étudier la provenance des couvertures neigeuses par télédétection. La zone de recherches est celle du bassin du Massif du Huayna Potosi (6088 m d'altitude), situé dans la Cordillère Orientale des Andes en Bolivie.

Ce travail constitue enfin une phase préliminaire du projet « Dynamique de la couverture neigeuse dans les Andes Tropicales » mené dans le cadre du Programme National de Recherche en Hydrologie sur cette même zone au cours de la saison des pluies 2001 – 2002.

1. Objectifs

1.1. Position du problème

Un des objectifs du programme Great Ice est de mettre en place un réseau d'observation durable des glaciers dans la zone tropicale, comme dans les Andes boliviennes sur le Zongo (4900-6088 m, Cordillère Royale). L'amélioration des connaissances hydrologiques, glaciologiques ou météorologiques ainsi que la gestion harmonieuse de la ressource en eau constituent les grands axes de recherche du programme.

1.1.1. Les glaciers, marqueurs des changements climatiques

Jusqu'à présent, les travaux menés dans le cadre de ce programme de recherche se sont surtout concentrés sur l'étude des glaciers tropicaux. Depuis dix ans, la réalisation et l'étude de bilans de masse et d'énergie a montré que ces glaciers étaient de très bons marqueurs de phénomènes climatiques de plus ou moins grande échelle (Francou et Ribstein, 1995 ; Ribstein et al., 1995 ; Pouyaud et al., 1996 ; Francou et al., 1997 ; Pouyaud et al., 1999 ; Wagnon, 1999). Plus sensibles que les glaciers alpins, ils sont des témoins privilégiés des changements climatiques.

1.1.2. Les glaciers, "objets hydrologiques"

Dans la continuité de l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les glaciers, la question s'est posée pour les ressources en eau d'origine pluviale et nivale (Caballero, 1998 ; Chaffaut, 1998) dans les hautes vallées. Ces glaciers ont une importance particulière dans les régions de montagnes tropicales où ils constituent une ressource renouvelable essentielle. Ils servent de réservoirs naturels de stockage et de restitution de la ressource hydrique et contribuent à régulariser les régimes des cours d'eau, en les alimentant pendant les mois sans précipitations et lors des années à pluviométrie déficitaire. Cette eau est largement utilisée pour l'alimentation domestique, la production d'hydroélectricité et l'irrigation.

1.1.3. Etude de la couverture neigeuse

Si l'on commence à bien comprendre le fonctionnement et l'intérêt des glaciers tropicaux, il est apparu au cours des travaux passés comme actuels que la dynamique de la couverture neigeuse est encore mal connue hors des glaciers, sur les moraines ou les hauteurs des versants des vallées, et qu'il était important de l'étudier plus finement pour la prendre en compte dans la modélisation des écoulements en aval.

S'agit-il d'une couverture fugace ou d'une accumulation plus longue? Les observations de terrain tendent à confirmer la rapidité de la disparition de cette couverture, selon l'altitude et la température moyenne de l'air, à des pas de temps infra journaliers.

1.1.4. Objectifs de notre étude

L'objectif de ce mémoire est donc de préciser la connaissance de l'élément « neige » du point de vue de son apparition au sol plus que de l'évolution de son couvert. La connaissance d'une température seuil au sol est nécessaire pour caractériser la nature solide ou liquide de la précipitation puisque la fraction nivale des précipitations peut représenter un volume d'eau important pour les modélisations.

1.2. Inscription dans le cadre d'un projet du Programme National de Recherche en Hydrologie

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet du Programme National de Recherche en Hydrologie intitulé « Dynamique de la couverture neigeuse dans les Andes Tropicales ». Il fera l'objet d'une phase expérimentale renforcée au cours de la saison pluvieuse 2001-2002 dans le bassin versant du Rio Zongo, sur un site dont l'altitude sera comprise entre 4900 et 5200 m. Le but est de tenter de répondre aux questions suivantes : quels sont les forçages climatiques engendrant les précipitations neigeuses ? Quelle est la dynamique verticale de la couverture neigeuse dans le continuum sol (rocher) / neige / couche limite atmosphérique en relation avec les forçages climatiques ? Quelle est la structure de la couverture ? Les modèles développés dans le contexte alpin sont-ils applicables ? C'est dans ce cadre d'expérimentation que s'inscrit ce travail de DEA.

2. Description du milieu d'étude

2.1. Milieu physique

2.1.1. Situation géographique

La zone d'étude se trouve à 30 km au nord de la ville de La Paz en Bolivie (Figure 1). Il s'agit du Massif du Huayna Potosi située dans la Cordillère Orientale (Figure 2), à l'intersection de la zone subtropicale amazonienne appelée « Yungas » et d'une zone froide d'altitude, l'Altiplano (Montes de Oca, 1995). Le bassin du Zongo a été retenu comme site expérimental du programme NGT en 1991 parce qu'il est à composante nivale et glaciaire, mais aussi parce qu'il est relativement proche et facile d'accès depuis la Paz, ce qui est indispensable pour la récupération des données et la maintenance des équipements.

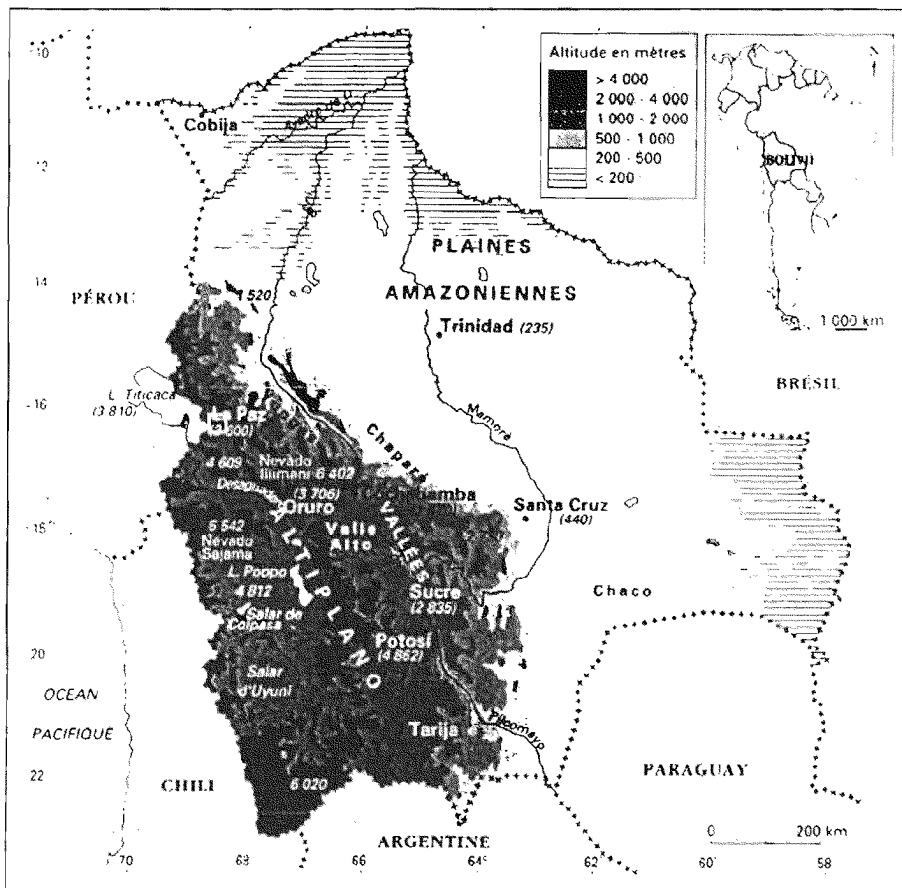


Figure 1 : Carte de la Bolivie (d'après Franqueville, 2000). Dans l'encadré blanc on localise la zone de la Figure 2

Cette zone est caractérisée par une forte amplitude altitudinale : on passe de plus de 6000 m à 1000 m en quelques dizaines de kilomètres seulement. Les paysages successifs sont très différents selon l'altitude. De haut en bas, on a des sommets rocheux culminant à plus de 6000 m, parfois enneigés ou recouverts d'une calotte glaciaire plus ou moins importante, puis, entre 4000 et 5000 m, des prairies d'altitude, entre 3000 et 4000 m, une végétation arbustive et enfin une forêt tropicale brumeuse en dessous de 3000 m.

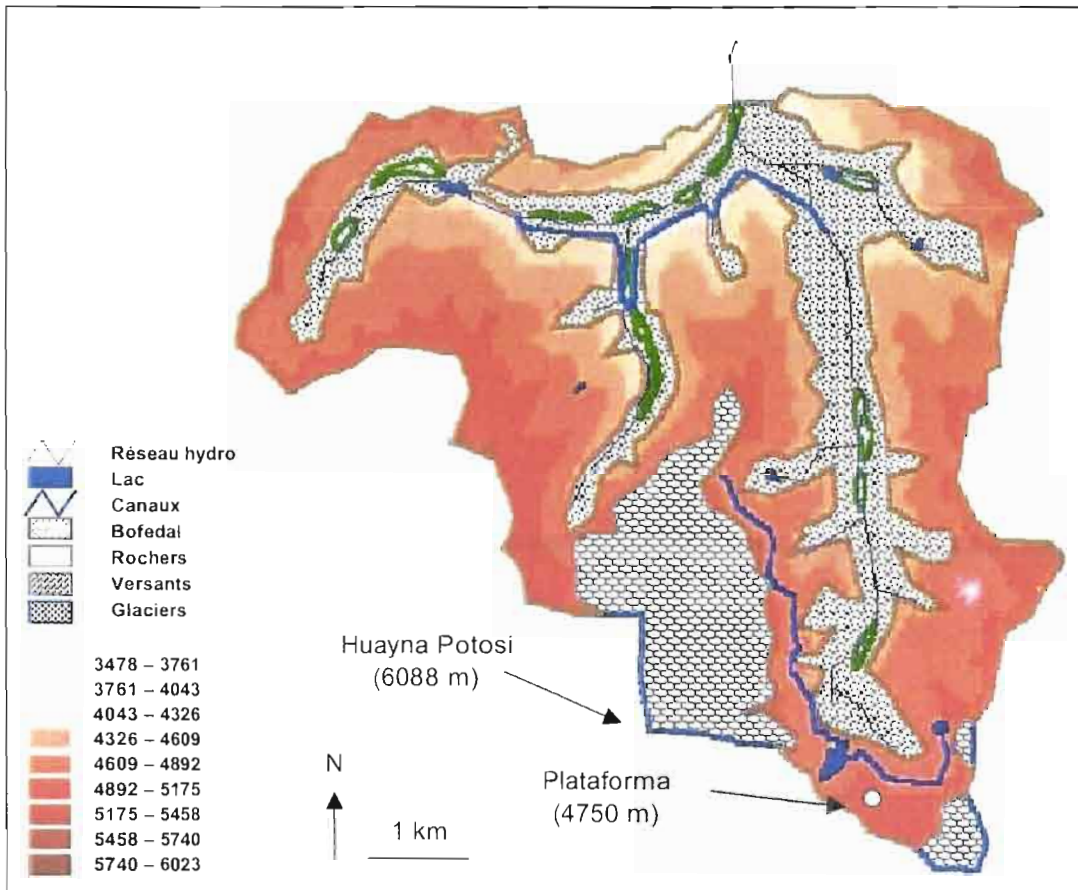


Figure 2 : Localisation du bassin versant du Zongo et cadre géomorphologique (carte extraite du SIG Arc View IRD, 2000)

Le comportement climatique évolue avec l'altitude, notamment la nature des précipitations : très rares pluies observées au-dessus de 5000 m, altitude au-dessus de laquelle les neiges sont persistantes, alors que l'on peut observer des chutes de neige à des altitudes plus basses : exceptionnellement à 3600 m dans la vallée du Zongo, vers 3900 m dans la vallée de La Paz.

La station météorologique dont nous avons utilisé les données se situe au lieu dit *La Plataforma* (4750 m), surplombant de quelques mètres un lac artificiel de retenue des eaux glaciaires (Lac Zongo, Figure 3). Le contexte est celui de la très haute montagne où la végétation est quasi inexistante. On est en dessous de la limite des précipitations exclusivement neigeuses et les précipitations observées peuvent être pluvieuses et/ou

neigeuses. C'est donc un secteur privilégié pour étudier la dynamique de la couverture neigeuse.

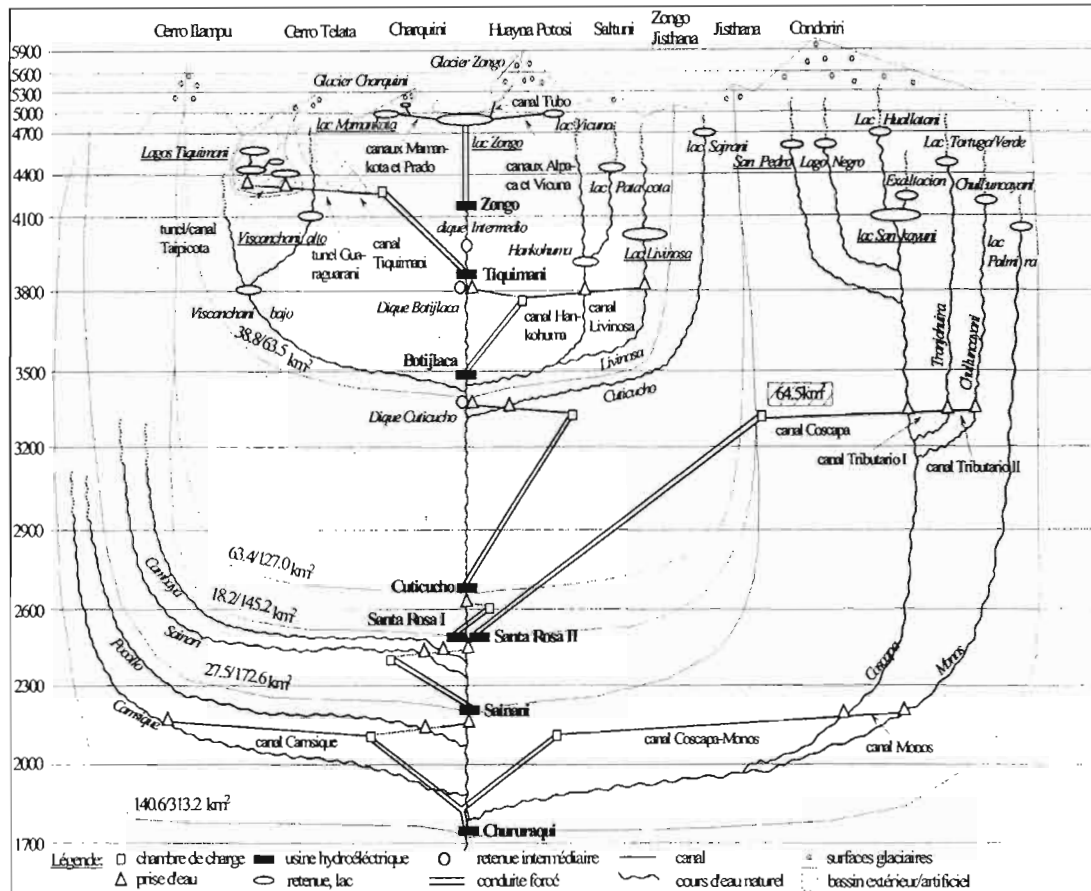


Figure 3 : Schéma du système hydraulique de la vallée du Zongo (d'après Reinhardt, 1997).

2.1.2. Saisonnalité du climat

Sur la zone d'étude, comme dans toute la Bolivie, on observe deux saisons marquées : une saison froide et sèche (hiver austral), qui débute fin mars après une période de transition, et une saison chaude et pluvieuse (été austral) qui s'installe vraiment en décembre (Roche, 1992). Cette saisonnalité est gouvernée par l'oscillation annuelle de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ITCZ).

Dans ce travail, on s'intéresse exclusivement à la période pluvieuse entre décembre et mars. Deux saisons des pluies ont été retenues pour l'analyse :

- décembre 1999 – mars 2000, période pour laquelle les observations de terrain sont bien documentées,
- période du 11 janvier 1999 au 28 février 1999 qui correspond aux dates du suivi satellitaire (tracking) que nous avons pu obtenir auprès d'une équipe de l'IRD travaillant au Brésil (CPTec/INPE, São José dos Campos, SP).

2.2. Considérations sur le climat en haute montagne tropicale

Pour comprendre ce qui fixe la limite pluie – neige et la dynamique de la couverture neigeuse, il est nécessaire de rappeler les spécificités climatiques du milieu de très hautes montagnes tropicales, ainsi que quelques principes de la formation des précipitations.

2.2.1. Spécificités du contexte tropical

2.2.1.1. *Rayonnement solaire et températures*

Dans la zone intertropicale, le soleil passe deux fois au cours de l'année au zénith, avec un balancement lié à son mouvement apparent par rapport à l'équateur. Ses rayons arrivent au sol sans inclinaison ou avec un angle d'incidence relativement faible. La répartition latitudinale du rayonnement solaire a des répercussions sur la distribution des masses d'air et sur le régime des vents et, par conséquent, sur les caractéristiques des précipitations.

C'est là où le rayonnement est le plus intense que se situe la zone de convergence intertropicale. Cette zone de basse pression, de forte instabilité thermique est à l'origine d'ascendances convectives et de fortes pluies (Aceituno, 1996); elle oscille de part et d'autre de l'Equateur atteignant sa limite nord entre juin et août et sa limite sud entre décembre et février. Les masses d'air qui y convergent sont thermiquement homogènes. Les systèmes de précipitations sont convectifs de petite échelle ; les alizés, vents d'est, dominant. La distribution des anticyclones et des dépressions à la surface de la Terre trouve son origine dans la répartition des températures.

Ces propriétés climatiques jouent sur l'altitude de la limite pluie - neige et de la limite des neiges et glaces permanentes : plus on s'éloigne de l'équateur, moins le rayonnement solaire qui arrive au sol est grand et plus elle est basse.

2.2.1.2. *Variations saisonnières et journalières*

Selon la latitude, les rythmes climatiques saisonniers et journaliers sont différents. Sous les tropiques, les changements saisonniers sont plus faibles que sous les climats tempérés ou polaires : le rayonnement solaire, la durée du jour ou les températures ont des variations saisonnières modérées. En Amérique du Sud, la variation annuelle des températures moyennes est inférieure à 10°C (Lliboutry, 1999 ; Vuille, 2000). Par contre, à l'échelle de la journée, les amplitudes thermiques sont élevées. C'est l'opposé sous les moyennes et hautes latitudes.

Ces différences latitudinales de régime de températures ont aussi un effet sur les caractéristiques des précipitations. Sur les hautes montagnes équatoriales, on peut observer des précipitations neigeuses tous les jours de l'année au-dessus de 4000 m. Sous des latitudes moyennes ou hautes, on observe des précipitations neigeuses que pendant les mois d'hiver.

2.2.2. Altitude

L'altitude a une forte influence sur les variables climatiques comme la pression atmosphérique, la température de l'air et le rayonnement. C'est un caractère déterminant pour expliquer les spécificités de notre zone d'étude.

Avec l'altitude, la pression atmosphérique, la densité de l'air et la température diminuent. La pression étant fonction de la température, on aura dans l'atmosphère tropicale des pressions plus grandes qu'à une même altitude sous des latitudes moyennes, puisque les

températures sont plus élevées sous les tropiques. A 4000 m en Bolivie, la pression atmosphérique est de 620 hPa (Aceituno, 1996).

2.2.3. Topographie

Il existe une relation importante entre les formes du relief (orographie) et les conditions climatiques ; cela confère à notre zone d'étude son autre caractère particulier en terme de météorologie.

Si un pic montagneux isolé n'a pas une grande influence sur le vent en général, il n'en est pas de même pour les chaînes puissantes comme les Alpes, les Andes ou l'Himalaya qui représentent des obstacles majeurs qui modifient profondément l'écoulement des masses d'air. La Cordillère des Andes forme un mur qui bloque les masses d'air humides venant du bassin amazonien. Bloquées par les reliefs les précipitations se déversent sur le versant oriental, alors que l'autre versant, l'Altiplano en Bolivie, est beaucoup plus sec. L'effet de barrière dépend de la dimension de celle-ci : altitude, longueur, largeur, de l'espace entre les crêtes. Elle dépend aussi de la masse d'air elle-même et de la direction du vent. De plus les vallées encaissées canalisent le vent qui peut suivre alors des directions fort différentes de celui du vent « dominant » circulant librement en altitude.

La pente et l'orientation des versants jouent aussi un rôle sur les phénomènes météorologiques. Les vents *anabatiques* et *catabatiques* sont produits par le réchauffement différentiel. Le vent anabatique se manifeste lorsque les pentes d'une vallée exposées au soleil se réchauffent plus rapidement que la vallée proprement dite. Ce réchauffement déclenche un mouvement ascendant de l'air, ce qui amène l'air froid de la vallée à gravir les pentes et à créer ainsi une circulation propre à cette vallée. Le vent catabatique se produit la nuit. Il est provoqué par l'air froid qui dévale les pentes de ces vallées qui sont encore sous l'effet du réchauffement diurne. Les vents catabatiques sont généralement plus forts que les anabatiques, surtout en montagne, lorsque les flancs sont glacés.

Toutes les caractéristiques du milieu vues dans cette partie (contexte tropical, haute altitude, topographie) et leur influence sur les variables climatiques (température, rayonnement, vent...) auront une importance déterminante sur le type de précipitation que l'on aura au sol, sur l'apparition de la neige et sur son devenir : disparition rapide ou, au contraire, persistance de plus ou moins longue durée.

Intéressons-nous maintenant aux processus générant les précipitations puis aux caractéristiques inhérentes à la neige. Toutefois, dans la suite, la variabilité spatiale et temporelle de ces variables climatiques ne sera pas prise en compte puisque l'on ne s'intéressera qu'aux mois de la saison des pluies à un lieu fixe.

2.2.4. Les systèmes précipitants

Le mot « précipitation » désigne tout ce qui provient de l'atmosphère sous forme d'eau liquide ou solide et tombant jusqu'au sol avec une vitesse appréciable (Queney, 1974). On utilise le mot « hydrométéore » pour parler de toutes les particules d'eau (gouttelettes, gouttes, neige, grêle, etc.) que l'on trouve dans l'atmosphère. En toute rigueur, le terme « météore » devrait être utilisé plutôt que celui de « précipitation ». En météorologie, les météores regroupent l'ensemble des phénomènes observés dans l'atmosphère ou à la surface de la terre qui consistent en une précipitation, suspension ou un dépôt de

particules liquides ou solides, aqueuses ou non. Dans notre étude, on cherche à rattacher les précipitations observées au sol à l'un des deux catégories : pluie ou neige.

La formation de précipitations requiert un processus en quatre étapes (Bingman, 1993) :

1. refroidissement de l'air jusqu'à approximativement la température du point de rosée
2. puis condensation autour d'un noyau pour former une gouttelette ou un cristal de glace
3. développement des gouttelettes ou des cristaux en goutte de pluie, en flocons ou en grêlons
4. et enfin apport de vapeur d'eau pour entretenir le processus

Quand l'air monte, il se rafraîchit si bien que la vapeur d'eau commence à condenser sous forme liquide. Pour cela, l'eau a besoin de noyaux de condensation, particules présentes en abondance dans l'atmosphère. Comme l'air continue à monter et à se rafraîchir, le nuage grandit, les gouttelettes de nuage existantes deviennent de plus en plus grandes, même si leur taille n'est que de quelques micromètres de diamètre. Ces minuscules gouttelettes « flottent » dans l'air sans chute. Lorsque le mouvement ascendant est plus fort, les gouttelettes grossissent davantage avant de devenir assez lourdes pour se libérer des courants verticaux et tomber sous forme de précipitations.

Il existe deux mécanismes pour expliquer la croissance des gouttelettes : la coalescence et l'*effet Bergeron*. La coexistence dans les nuages de gouttelettes et de cristaux de taille et de masse très variées laisse supposer que tous ces éléments se déplacent à des vitesses différentes, entrant fréquemment en collision et se soudant. C'est la croissance par coalescence où les gouttelettes nuageuses résultent de la capture des petites par les plus grosses. Plus les turbulences sont grandes à l'intérieur du nuage, plus la coalescence est importante. C'est ce qui explique que les plus gros flocons de neige ou les plus grosses gouttes de pluie viennent généralement des nuages convectifs. L'autre effet pour invoquer la croissance des précipitations est l'*effet Bergeron* : lorsque la température d'un nuage est inférieure au point de congélation, il peut y avoir coexistence de cristaux de glace et de gouttelettes surfondues. L'air étant sursaturé par rapport à la glace, ces cristaux grossissent aux dépens des gouttelettes par un processus de distillation (Barry, 1982, Queney, 1974). Après avoir atteint une taille suffisante, ils tombent du nuage et fondent dans une couche où la température est supérieure au point de congélation.

2.2.5. Pluie ou neige?

La pluie est une précipitation qui atteint le sol sous forme de gouttelettes d'eau liquide. Elle se développe souvent dans des nuages dont la température est inférieure à 0°C. Donc, avant d'être sous forme liquide, les gouttelettes de pluie sont souvent des cristaux de glace ou des gouttes congelées. Ces particules congelées fondent lorsqu'elles pénètrent dans l'air plus chaud sous les nuages. C'est pourquoi elles arrivent au sol sous forme liquide. Il faut donc, pour que la pluie tombe, que les gouttes d'eau ou les cristaux de glace des nuages deviennent suffisamment gros et lourds.

Si le refroidissement est important, la pluie se transforme en neige. La neige se forme au sein d'un nuage lorsque la température est inférieure à 0°C. Lorsque l'eau gèle, elle se cristallise. Pour commencer, des cristaux se forment lorsque les molécules d'eau gèlent ou

lorsqu'ils s'agglomèrent autour de noyaux de poussière. Ces cristaux grandissent par accumulation de glace. Lorsqu'ils sont assez lourds, ils traversent les nuages et tombent. Si la température est suffisamment basse (proche ou inférieure à 0°C), ces cristaux demeurent intacts jusqu'au sol.

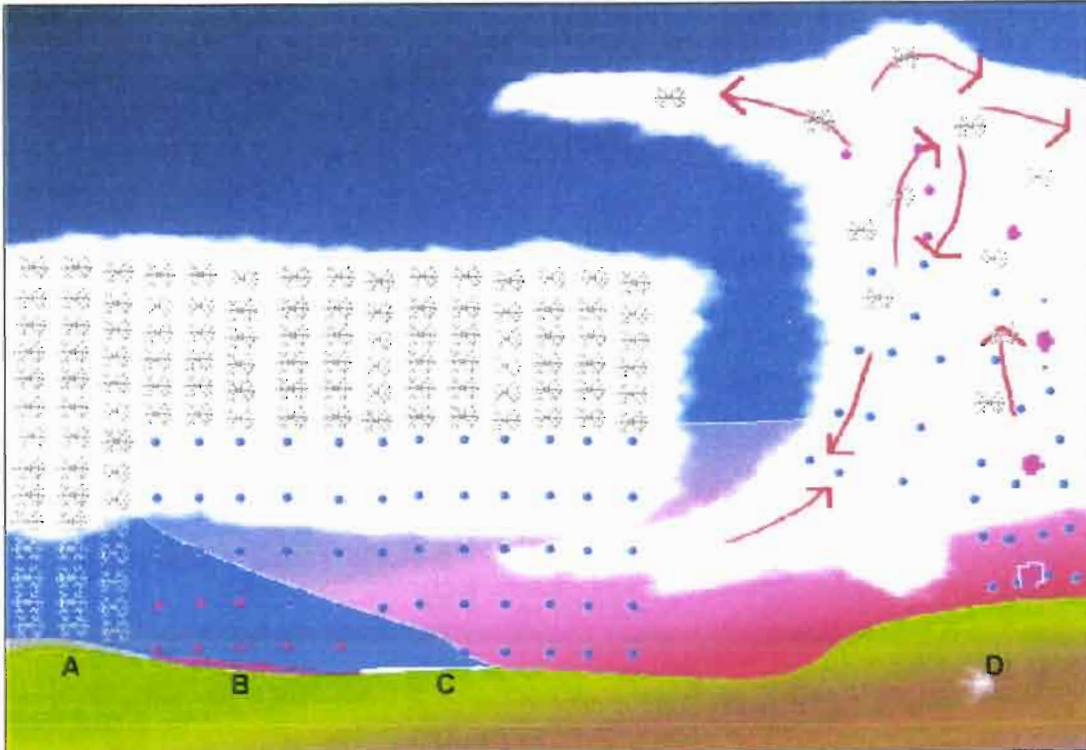


Figure 4 : Structure atmosphérique de température associée aux principaux types de précipitation (A : neige, B : neige fondue, grêlons, C : verglas, D : pluie)

La plupart des précipitations commencent donc sous forme de neige, même lorsque ce que nous voyons à terre est de la pluie. D'autres types de précipitations peuvent être associés. La Figure 4 montre la structure atmosphérique des températures associées aux principaux types de précipitation. A gauche, la température de l'air est partout au-dessous du point de congélation. La forme de précipitation est la neige et elle atteint le sol sous cette forme (Figure 4, A). Un peu plus à droite, une petite couche de l'atmosphère est au-dessus du point de congélation, mais la couche d'air proche de la terre est au-dessous du point de congélation. La neige tombe dans l'air chaud, elle fond, mais regèle lorsqu'elle passe dans l'air froid près du sol. Elle atteint la terre comme gouttes de pluie gelées, neige fondue ou grêlons (Figure 4, B). Plus à droite encore, la couche d'air au-dessous de la congélation est peu profonde. Les gouttes de pluie tombantes n'ont pas le temps de geler avant d'atteindre la terre, mais quand elles frappent des surfaces au sol en dessous de zéro 0°C, elles gèlent au contact (congélation de gouttes d'eau par impact). C'est le givre ou le verglas (Figure 4, C). Quand l'air est chaud partout, la situation est plus simple. La neige fond à la descente et tombe sous forme de pluie (Figure 4, D). C'est ainsi que se forme la plupart de la pluie.

2.2.5.1. *Pourquoi vouloir distinguer le type de précipitation que l'on a au sol ?*

La question de savoir quelle portion de précipitation tombe sous forme de neige ou de pluie est importante, pas seulement pour la réalisation des bilans de masse des glaciers et des couverts neigeux saisonniers, mais aussi pour la modélisation et la prévision des écoulements (Rohrer, 1989). Pour beaucoup de modèles d'écoulement de bassin versant qui nécessitent une connaissance de la quantité de précipitations tombées à un endroit donné pour une période donnée, le type de précipitation - pluie ou neige - modifie l'hydrogramme à l'exutoire du bassin. En effet, la couche nivale agit de façon semblable à un réservoir (Llomas, 1993). Si cette capacité de rétention est dépassée lors d'une pluie par exemple, l'excès d'eau peut contribuer à l'écoulement. A l'inverse, lors d'une chute de neige il n'y a généralement pas d'écoulement immédiat. Autre rôle de la neige : sur un glacier, elle peut augmenter l'albédo de 0.3 à 0.9 et ainsi réduire nettement la fonte de la glace pour quelques temps. A l'inverse une pluie sur une zone d'un glacier dépourvue de neige peut ruisseler très rapidement.

Par conséquent, une caractérisation des formes de précipitations peut avoir de sérieuses répercussions sur les performances d'un modèle d'écoulement.

Sur notre zone d'étude, Caballero (thèse en cours) cherche à modéliser la production d'écoulement dans la vallée du Zongo à l'aide du schéma de surface ISBA développé par le centre de recherche de Météo France (Noilhan & Planton, 1989, Noilhan & Mahfouf, 1996).

ISBA distingue les précipitations liquides et solides et utilise pour les discriminer une température seuil en dessous de laquelle les précipitations seront considérées comme solides. La connaissance de cette température critique devient donc un préliminaire indispensable pour la mise en œuvre de la modélisation.

2.3. Considérations générales sur la neige

2.3.1. Recherche des conditions climatiques fixant la limite pluie neige

2.3.1.1. Définition de température critique

Le critère le plus naturel pour discuter des formes de précipitations que l'on retrouve au sol est la température de l'air au niveau de la zone d'étude. Cependant, « la température de la couche d'air dans laquelle la neige est formée doit être clairement distinguée de la température de la couche à travers laquelle la neige tombe » (Humboldt, 1843), ainsi que de la température de l'air au sol et de la superficie interceptrice.

On peut définir une température critique de l'air en surface, pour l'occurrence de pluie ou de neige au sol : c'est la température en deçà ou au-delà de laquelle on n'observe plus de neige ou de pluie. On délimite alors des domaines d'existence d'un type de précipitation par classe de température de l'air au sol.

2.3.1.2. Etat des connaissances

Après un important travail d'interrogation des principales bases bibliographiques, il apparaît que cette question est relativement peu traitée. Nous n'avons retenu que des travaux effectués aux Etats-Unis (Auer, 1974) dans les Alpes suisses (Rohrer, 1989) ou en URSS (Shwer, 1989). Il ne semble pas que de telles études existent pour la Cordillère des Andes ou pour les régions tropicales, ni même d'ailleurs pour l'hémisphère sud. Par contre, des méthodes de prédiction du type de précipitation arrivant au sol utilisant un ensemble de paramètres thermiques locaux sont développées aux Etats-Unis et au Canada où l'hiver est long et les périodes de neige fréquentes.

Auer étudie 1000 observations météorologiques de surface selon le type d'occurrence, solide (neige) ou liquide (pluie), et la température correspondante, sans prendre en compte l'intensité de la précipitation. Il ne précise pas les sites de ces observations. Les relevés de surface suspectés d'être associés à des conditions favorables au verglas, au brouillard givrant ou autres n'ont pas été pris en compte. Les événements mixtes (pluie mêlée à la neige) ont été comptabilisés dans les deux catégories (à la fois comme de la pluie et de la neige), mais ceci ne constitue que 3.5% de l'échantillon total.

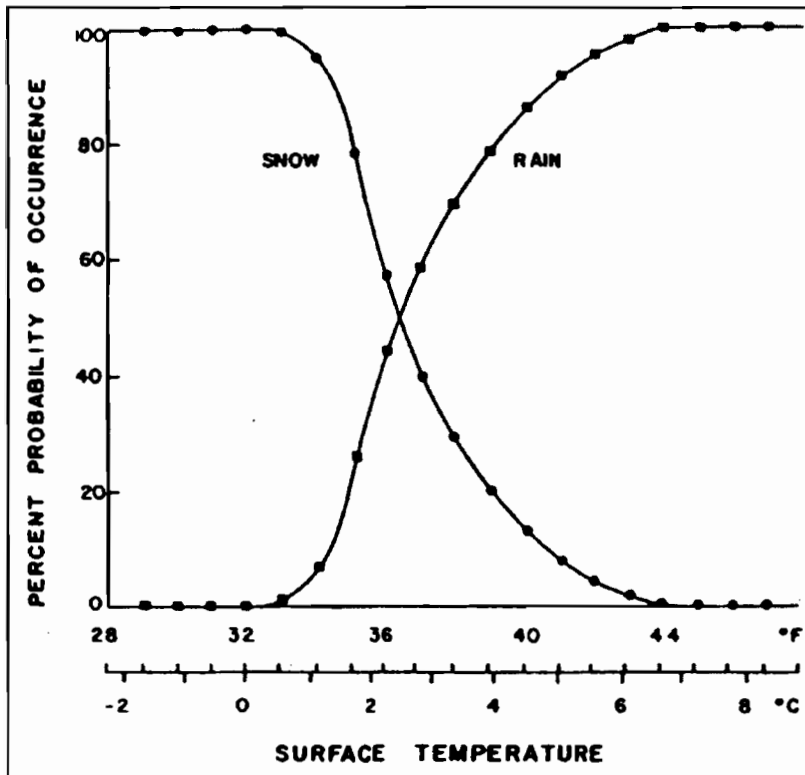


Figure 5 : Probabilité d'occurrence de la pluie ou de la neige pour chaque degré Fahrenheit (d'après Auer, 1974).

La Figure 5 ci-contre montre les résultats de son analyse : pour chaque degré Fahrenheit, le pourcentage de probabilité d'occurrence de pluie ou de neige à été calculé en déterminant le nombre de fois où une occurrence de pluie ou de neige a été observée. On voit que l'on a une probabilité égale d'avoir de la pluie ou de la neige au sol à la température de 2.5°C. A des températures plus froides, la probabilité d'avoir de la neige plutôt que de la pluie augmente, si bien qu'en dessous de 1.1°C la probabilité que le type de précipitation soit de la neige est de 95%.

A l'inverse, à des températures supérieures à 2.2°C (36°F), la probabilité d'avoir de la pluie comme précipitation prédominante augmente jusqu'à 5.6°C où elle est de 95%. Pour des températures supérieures ou égales à 6.1°C, il n'y a pas de neige observée en surface, ce qui fait dire à Auer que cette température est la température seuil pour l'occurrence de chute de neige en surface. On observe toujours des précipitations neigeuses pour des températures inférieures à 0.55°C (33°F), jamais au-dessus de 6.1°C, et avec une probabilité à celle de la pluie vers 2.5°C.

Rohrer (1989) dans les Alpes suisses propose également une détermination de la température de l'air limite entre pluie et neige ; mais il la combine avec l'intensité des précipitations. Dans son étude, l'accent est mis sur l'aspect statistique et l'examen de cas individuels. A partir de longues séries des stations de l'Institut Suisse de Météorologie de 1901 à 1977, puis de 1981 à 1988, il étudie la fréquence des événements de précipitations de type pluie, neige ou précipitation mixte dans une fourchette de température au-dessus

et au-dessous de 0°C. Les observations sont regroupées par classes de 0.5°C. Il montre que le pourcentage relatif de ces formes de précipitation dépend de la localité, de l'heure de l'observation et parfois de la saison de l'observation. Selon lui, la température humide de l'air est en relation plus étroite avec la forme de précipitation que la température sèche de l'air. La raison est que les chutes de neige ayant lieu à des températures plutôt élevées tombent généralement à des humidités relatives basses. Les chutes de neige se produisant à une température de l'air relativement élevée sont toutes de faible intensité alors que les pluies à des températures inférieures à 0°C sont rares et généralement de faible intensité.

Shwer étudie le complexe température de l'air – précipitations atmosphériques pour analyser des séries climatiques en URSS. En séparant l'année en une saison chaude (avril - octobre) et froide (novembre - mars), il regarde le type de précipitation qui prévaut, par mois, régions et quelles sont les températures associées. Même s'il regarde les températures au sol auxquelles arrivent ces précipitations, il ne définit pas de température critique pour l'occurrence de pluie ou de neige en surface.

Même si la température de surface est une valeur importante pour déterminer l'occurrence de neige ou pluie, elle n'est pas le seul critère pertinent. C'est pourquoi elle est généralement utilisée en combinaison avec d'autres paramètres thermiques. Ainsi, la plupart des prévisionnistes regardent aussi les températures des niveaux supérieurs, l'épaisseur de différentes couches atmosphériques ou l'altitude de l'isotherme 0°C pour la prévision de la neige ou de la pluie.

Les températures à certains niveaux de pression constants sont connues pour donner une première idée de la localisation de la limite pluie/neige à la surface. Aux Etats-Unis par exemple, la ligne de pression 850 mb et l'isotherme 0°C sont largement employés pour cette détermination. Lorsque les masses d'air sont au-dessous de 0°C au niveau 850 mb et à la surface, il est peu probable que la température de l'air soit au-dessus de 0°C à un autre niveau, et la prévision sera la neige. A l'inverse, quand l'air est au-dessus de 0°C au niveau 850 mb et à la surface, il est probable que la neige fonde et qu'elle se retrouve sous forme de pluie.

Une façon supplémentaire de déterminer le type de précipitation est d'employer les épaisseurs de différentes couches de l'atmosphère. L'épaisseur entre deux niveaux de pression est directement proportionnelle à la température moyenne de la couche entre ces deux niveaux. Des valeurs plus froides indiquent une forte probabilité d'avoir de la neige alors que des valeurs plus hautes indiquent une plus grande chance d'avoir de la pluie. C'est un outil important de prédiction du type de précipitation en hivers.

Ces différents travaux ont mis en évidence le caractère local de validation de ces résultats et il ne semble pas que l'on puisse les appliquer à notre zone d'étude qui diffère beaucoup par sa latitude et surtout par l'altitude du bassin-versant qui s'étage entre 3000 et 6100 m. Les résultats obtenus ailleurs et dans d'autres conditions ne peuvent constituer qu'une première approche et éventuellement une base à un protocole d'expérimentation. Dans notre étude, comparativement à celle réalisée par Rohrer, on s'affranchit complètement de la variabilité spatiale, puisque tous nos événements de précipitation sont observés au même emplacement, et en grande partie de la variabilité saisonnière puisque notre étude

ne concerne que la saison des pluies. Ne disposant pas de données de radio sondage, nous n'utiliserons que les données météorologiques au sol pour réaliser le même type d'étude statistique que Auer.

2.3.2. Modélisation de la dynamique de la couverture neigeuse

Les précipitations neigeuses qui se retrouvent accumulées en surface, « hors glaciers », le sont pour des périodes allant de l'heure au mois avant de fondre ou d'être sublimée. Le plus souvent l'eau s'infiltré et se trouve restituée au cours d'eau après un transfert souterrain dans les formations superficielles de pente et de fond de vallée (Jomelli et al, 2001). Dans notre zone d'étude, les observations de terrain ont souvent confirmé le caractère « fugace » de ces précipitations.

Dans la littérature, il existe un grand nombre de travaux se rapportant au comportement de la couverture neigeuse et à ses modélisations diverses : modèles de fonte, modèles de détermination de l'équivalent en eau de la neige, modèle de simulation de l'enneigement d'un bassin versant, modélisation de la variabilité de l'enneigement sur un bassin. Ces modèles plus ou moins complexes sont généralement des modules intégrés dans des modèles hydrologiques ainsi que dans des modèles de climat locaux ou de Circulation Générale (MCG).

Trois types de modèles sont généralement distingués :

2.3.2.1. Modèles degré-jour (modèle conceptuel)

Ce sont les modèles de neige les plus anciens et les plus simples. Leur but est de calculer la fonte nivale et de transformer la neige en eau disponible pour l'écoulement. L'hypothèse de ces modèles est que la température de l'air est le paramètre dominant le déclenchement de la fonte. Ces modèles ne fournissent pas de simulation réaliste du manteau neigeux. Singh & Kumar (1996) utilisent ce type de modèle dans le bassin glaciaire du Dokriani en Inde.

2.3.2.2. Modèles à bilan énergétique de surface

Dans ces modèles, le bilan énergétique de surface est explicitement simulé pour calculer la fonte. Le caractère déterminant du manteau neigeux est la superficie de la couverture neigeuse qui modifie les échanges avec l'atmosphère. La couverture neigeuse est souvent décrite par des modèles de 1 à 3 couches.

Ces modèles de neige utilisant une description fine des caractéristiques de surface du manteau neigeux sont pris en compte essentiellement dans les Modèles de Circulation Générale où la neige joue un rôle important pour les échanges.

ISBA (Noilhan & Planton, 1989), modèle d'échange sol-atmosphère possédant un schéma de neige à bilan énergétique de surface développé par Douville et al., (1995), prend en compte les principaux processus physiques contrôlant l'interaction entre les surfaces continentales et l'atmosphère. Le schéma de neige est basé sur la modélisation d'une seule couche de neige et le calcul de 3 variables caractérisant le manteau neigeux : l'équivalent en eau, la masse volumique et l'albédo.

2.3.2.3. *Modèles de neige détaillés*

Ils décrivent la stratigraphie et l'état interne du manteau neigeux de manière très précise où la nature des grains est calculée et reliée aux caractéristiques macroscopiques de chaque couche (densité, albédo, contenu en eau liquide...).

Ces modèles sont généralement complexes et nécessitent un jeu de données météorologiques précis : dans ce cas ils apportent une amélioration de la simulation de la fonte nivale.

CROCUS, développé en France par le Centre d'Etude de la Neige (CEN) de Météo France et validé sur l'ensemble des Alpes (Brun et al., 1989, 1992), est un modèle de neige multicouche sophistiqué calculant l'état interne du manteau neigeux à partir de variables météorologiques et de l'état du manteau neigeux (métamorphisme des grains de neige).

Ce qu'il faut retenir

Cette étude a été réalisée dans un contexte géographique et physique très particulier, celui d'une région tropicale montagneuse de très haute altitude. On y retrouve à la fois les caractéristiques climatiques des zones tropicales et celles de la très haute montagne :

- rayonnement solaire fort
- amplitudes thermiques saisonnières relativement faibles
- deux saisons : la première humide et chaude où la fonte est maximale, l'autre sèche et froide
- influence de l'altitude sur les variables climatiques comme la température ou la pression atmosphérique
- influence de la topographie sur la climatologie locale : la cordillère des Andes constitue une barrière pour les masses d'air humides venant de l'Amazonie et le système sec généré par le courant de Humboldt dans l'Océan Pacifique.

Tout ceci a une influence sur le type de précipitation que l'on retrouve au sol, pluie ou neige, et sur son devenir, notamment pour la neige : persistance ou disparition rapide de la couverture neigeuse souvent peu épaisse, malgré les altitudes élevées.

A l'échelle événementielle, la plupart des précipitations naissent sous forme de neige dans les nuages et ce sont les caractéristiques du milieu, la température de l'air notamment, qui vont fixer l'arrivée au sol d'une précipitation neigeuse ou pluvieuse.

A l'échelle saisonnière, la sensibilité de cette région aux variations climatiques et plus particulièrement à l'augmentation de la température, a pour conséquence une modification du régime de précipitation, transformant à certaines altitudes élevées les chutes de neige en averses pluvieuses.

Il est donc important de s'intéresser à la nature des précipitations et à la dynamique de la couverture neigeuse hors des zones englacées.

Les travaux sur ce sujet sont peu nombreux et s'appliquent à des régions très différentes de la notre. Cette étude est la première réalisée dans ce contexte géographique et climatique.

3. Données et mesures

Notre étude s'appuie sur des données météorologiques issues d'enregistrements de stations pluviométrique et météorologique, mais également sur des observations visuelles de terrain. Toutes ces données proviennent d'un même site, la Plataforma, à 4750 m d'altitude (Figures 1, 2 et 3).

3.1. Données météorologiques

3.1.1. Observations visuelles des précipitations

3.1.1.1. Acquisition

Au lieu dit la Plataforma, un opérateur bolivien de la Cobee effectue un relevé quotidien du pluviomètre, et, parallèlement, il note l'heure et le type de précipitations qui survient tout au long de la journée. En plus des précipitations, il consigne dans un « bulletin météorologique » le type de temps, l'enneigement et l'heure d'arrivée des nuages à la Plataforma.

Aux notes de cet observateur, on ajoute les observations de terrain réalisées lors des missions bimensuelles des équipes de l'IRD se rendant sur le glacier ou dans la vallée du Zongo. Cet ensemble d'observations visuelles complète les données climatologiques et peut être comparé aux enregistrements pluviométriques et météorologiques automatiques, dont la température de l'air.



Figure 6 : Massif du Huayna Potosi, Cordillère Royale. La route carrossable est marquée par un trait interrompu noir. 07/09/1999 vers 7h00. (Photo : Leblanc J.M).

Par ailleurs à l'occasion des visites de routine, on a pu observer visuellement certains des phénomènes météorologiques qui intéressent notre étude, comme le caractère fugace de la neige tombant hors des zones englacées. En effet, il n'est pas rare de rencontrer aux premières heures du jour de la neige sur le chemin menant au massif du Huayna Potosi à des altitudes variables, plus ou moins basses. Elle disparaît très souvent complètement, par fonte ou par sublimation dans les heures qui suivent. Sur la Figure 6, photo prise le 07/09/1999 vers 07h00 le matin, tout le massif est sous la neige, et le soir on ne l'observe plus qu'au-dessus de la ligne de neige telle qu'on la voit habituellement en saison sèche vers 5200 m d'altitude. En dessus la neige ou la glace est permanente, en dessous la neige est plus fugace puisqu'elle ne perdure plus sur des parties englacées. Les observations visuelles confirment donc la dynamique très particulière de la couverture neigeuse hors des zones englacées et en particulier la rapidité des phénomènes de fonte et de sublimation.



Figure 7 : Station météorologique automatique sur le glacier du Zongo (5150 m). On aperçoit au front du glacier des nuages redescendant dans la vallée du Zongo. 12/12/99, 18h00. (Photo : Leblanc J.M).

Un autre phénomène est observé lors de nos visites sur le terrain : le cycle journalier des masses nuageuses et des précipitations. En saison des pluies, les phénomènes convectifs qui se développent le matin avec l'échauffement de la surface du sol provoquent une élévation par advection des masses d'air humide provenant des Yungas. En milieu de

journee, un brouillard remonte la vallée du Zongo jusqu'au niveau de la Plataforma et du glacier. C'est à ce moment que l'on observe les précipitations. Lorsque la nuit arrive, la convection thermique s'arrête et l'atmosphère devenant stable, l'advection des masses d'air humide cesse et on voit progressivement le brouillard redescendre dans la vallée (Figure 7). La nuit, le ciel est généralement dégagé et ce cycle recommence avec le lever du soleil (Wagnon, 1999).

3.1.1.2. *Critique des données*

Il faut noter le caractère subjectif des appréciations qualitatives. Il arrive que l'observateur note une précipitation sans en caractériser la nature ; dans ce cas, on considère qu'elle correspond, par défaut, à un événement pluvieux, en admettant que l'événement neige, un peu plus exceptionnel, est noté avec plus de soin quand il se produit. Il subsiste le problème des précipitations survenant la nuit que l'opérateur ne peut pas suivre systématiquement, ni même se rendre compte avec précision de leur occurrence. Certains événements pluvieux peuvent donc échapper à l'observation et on peut également penser qu'une précipitation nocturne n'est considérée comme de la neige que si des "traces" sont visibles le matin.

3.1.2. Station pluviométrique

3.1.2.1. *Descriptif et données recueillies*

Le dispositif de mesure est le suivant : un pluviomètre relevé chaque jour par un opérateur bolivien de la compagnie Cobee. Ce relevé est effectué à 07h00 du matin, et les précipitations sont attribuées au jour précédent. Un pluviomètre totalisateur est relevé chaque mois par le même opérateur.

On recueille les données suivantes : la pluie journalière à 4750 mètres et la pluie mensuelle à 4750 mètres.

2 stations limnigraphiques de type Limni 92 mesurent toutes les 15 minutes les variations de hauteur d'eau de 1 mm, l'une à l'émissaire des eaux du glacier à 4830 m, l'autre à Liviñosa dans la vallée du Zongo à 4000 m. Ces stations sont également équipées de pluviomètre à augets basculant qui enregistrent les basculements qui se produisent dès qu'il reçoit 0.2 mm de hauteur d'eau. Les données sont enregistrées par la station qui possède une grande capacité de stockage et sont récupérées lors des visites de routine.

3.1.2.2. *Fiabilité des données*

Il n'y pas de lacune pour les périodes étudiées. Ces données sont considérées comme fiables. Il faut cependant souligner que l'on a constaté une sous-estimation des précipitations pour tous les pluviomètres de la zone (Sicart, 2001, soumis) et que ce déficit de captation est plus important pour les précipitations solides que pour la pluie (Figure 8). Il dépend principalement de la vitesse du vent, de la température et du type de pluviomètre. En effet les pluviomètres utilisés ne sont pas chauffants et n'ont pas de pare-vent : la neige recueillie dans le collecteur peut rester un certain temps sous les influences extérieures comme le rayonnement solaire ou le vent avant d'être comptabilisée, ce qui peut engendrer des sous-estimations importantes de l'équivalent en eau. Autre problème auquel nous sommes confrontés : lors de la lecture du volume d'eau recueilli dans le pluviomètre, on ne peut pas distinguer la fraction correspondant à de la pluie ou à de la neige.

Ces problèmes seront résolus très bientôt par la mise en place d'un nouveau pluviomètre à alcool donnant les précipitations horaires, pluviomètre spécifique pour les mesures de chutes de neige.

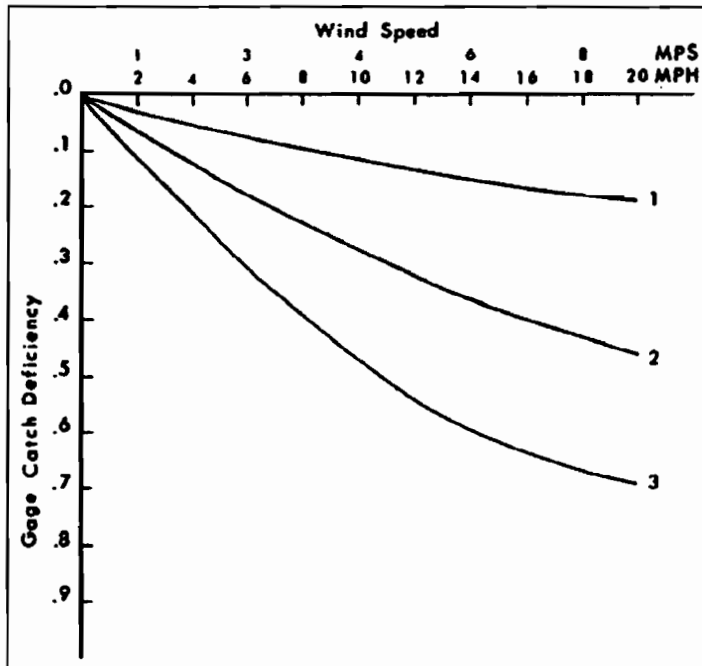


Figure 8 : Probabilité de précipitations non interceptées par un pluviomètre en fonction de la vitesse du vent et du type de pluviomètre. 1 : pluie, 2 : neige, pluviomètre avec un pare-vent, 3 : neige, pluviomètre sans pare-vent (d'après Larson et Peck, 1974).

3.1.3. Station météorologique

3.1.3.1. *Descriptif*

Cette station météorologique comporte les capteurs suivants :

Sonde de température située à 190 cm du sol

Sonde d'humidité relative située à 190 cm du sol

Pyranomètre courtes longueurs d'ondes situé à 155 cm du sol, orienté vers le ciel

Anémomètre situé à 230 cm du sol

3.1.3.2. *Données recueillies*

Nous disposons des moyennes demi-horaires et journalières suivantes :

Température sèche de l'air à 190 cm du sol

Humidité de l'air à 190 cm du sol

Rayonnement solaire incident

Vitesse du vent à 230 cm du sol

3.1.3.3. Critique des données

Il n'y a pas de lacunes sur les périodes de l'étude et les données sont considérées comme fiables.

3.2. Données satellitales

3.2.1. Applications de la Télédétection à l'étude de la neige

De nombreux travaux s'intéressent aux applications de la télédétection pour l'étude de la neige et de la glace. D'une manière générale, Meier (1980) décrit les différents capteurs, actifs ou passifs, des satellites américains et russes, opérant dans le visible, l'infra rouge et les micro-ondes, susceptibles d'être utilisés en télédétection pour la neige ou la glace. Hall (1996) étudie les possibilités offertes par l'imagerie radar en terme de télédétection appliquée à l'hydrologie et à l'étude de la neige, l'utilisation de capteurs multi-fréquence et multi-polarisation, la capacité des micro-ondes à pénétrer la surface de différents matériaux. Rango (1980, 1993, 1994 et 1996) présente dans ses nombreux travaux les applications de la télédétection satellitale en hydrologie et plus particulièrement pour l'étude de la neige : cartographie de l'extension des zones de neige en utilisant des capteurs dans le visible et le proche infrarouge, mesure de l'épaisseur de la couverture neigeuse et estimation de la teneur en eau de la neige en utilisant des techniques passives micro-ondes, estimation de l'humidité de la neige ou de la fonte, détermination de l'albédo ou de la taille des grains de neige. D'autres auteurs cherchent à estimer la distribution spatiale de la couverture neigeuse en montagne en utilisant la télédétection et un modèle distribué d'énergie (Cline et al., 1998) ou à cartographier le couvert neigeux à une résolution inférieure au pixel à partir d'image Landsat TM (Rosenthal et Dozier, 1996). L'utilisation de données d'instruments micro-ondes embarqués sur satellites est en cours de développement et constitue certainement le futur de la télédétection appliquée à l'hydrologie glaciaire et nivale (Mognard, 2001).

Nous n'avons pas trouvé de publication s'attachant à notre thématique pour notre zone d'étude. Dans les Andes Tropicales, les travaux de télédétection concernent surtout le suivi des glaciers : données acquises dans les domaines du visible et de l'infrarouge, non utilisables en présence d'un couvert nuageux important, et données radar qui offrent une vision tout temps : on peut ainsi suivre leur évolution dans l'espace et le temps, leur déplacement, l'enneigement et l'altitude de la ligne de neige. En Bolivie, Muller (1998) réalisent un suivi de la ligne de neige du volcan Sajama à l'aide d'images Landsat, toutefois il semble que l'utilisation de données radar (télédétection active) s'impose pour suivre cette altitude en toute saison et en terrain montagneux (Arnaud et Ribstein, 2001).

3.2.2. Objectifs

La répétitivité de l'observation doit être compatible avec la durée de vie du phénomène à étudier, c'est-à-dire ici l'évolution de la couverture neigeuse dans l'espace et le temps. Le suivi satellitaire de ce phénomène fugace se révèle difficile, surtout s'il s'accompagne de conditions défavorables à la prise de vues par la présence de nuages, liée à la saison des pluies. Les capteurs passifs à haute résolution spatiale mais faible répétitivité (par exemple, Landsat TM avec deux passages mensuels) ne suffisent pas et seule la haute

répétitivité temporelle de capteur du type NOAA/AVHRR (passages quotidiens), mais à une moins bonne résolution spatiale, pourraient apporter des solutions.

Face à ces problèmes d'observation de la surface avec les images satellites dans les canaux du visible ou de l'infrarouge, l'alternative choisie est de s'intéresser à ce qui pose précisément problème dans l'approche précédente, c'est-à-dire la couverture nuageuse.

L'idée est de coupler les données satellitales pertinentes à une information climatologique de terrain pour essayer de caractériser les amas nuageux responsables des précipitations et, si possible d'en caractériser le type, pluie ou neige.

Nous avons pu obtenir les données de suivi d'amas nuageux couvrant toute l'Amérique du Sud, pour la période allant du 11 janvier 1999 au 28 février 1999. Elles nous ont été fournies par Henri Laurent et Nadine Dessay, chercheurs de l'IRD travaillant au Brésil en partenariat avec le CPTec/INPE (São José dos Campos, São Paulo) dans le cadre de l'expérience scientifique internationale LBA.

L'algorithme automatique employé pour nos données a été développé par Henri Laurent, puis analysé et amélioré par Mathon et Laurent (2001). Mathon (2001) l'utilise en Afrique de l'Ouest pour un suivi des systèmes convectifs de méso-échelle. La méthode de suivi, entièrement automatique, s'inspire des méthodes utilisées par Williams et Houze (1987) et Arnaud et al. (1992). Elle est basée sur le recouvrement des systèmes nuageux entre deux images GOES. Ces images GOES ont une pleine résolution : résolution spatiale d'environ 5 km, répétitivité toutes les 30 minutes. Les nuages sont détectés par un seuil sur la température de brillance (235 et 210°K) du sommet des nuages. Quand plusieurs amas se recouvrent, on prend la paire qui correspond à la surface maximum de recouvrement. Un test de recouvrement est effectué et permet de différencier objectivement les cas de naissance, de séparation, de fusion ou de dissipation des amas nuageux. Il existe aussi un module d'interpolation des données manquantes.

Cette méthode permet de suivre et d'identifier les systèmes nuageux de taille supérieure à 5000 km² et de classer les nuages précipitant.

En utilisant cette méthode pour notre zone, on souhaite définir de manière objective les amas nuageux responsables de l'essentiel de la pluviométrie observée et caractérisée au sol (pluie ou neige).

Ce qu'il faut retenir

Au cours de cette étude, nous avons utilisé des données de différentes natures.

Au sol, nous disposons :

- de données qualitatives : observations visuelles de terrain
- de données météorologiques issues d'une station automatique Mévis, installée à 4750 m d'altitude
- de données pluviométriques, relevées quotidiennement par un opérateur ou enregistrées automatiquement par une centrale d'acquisition

Nous avons aussi utilisé une information élaborée à partir des données fournies par le satellite météorologique GOES et constituée par un suivi des systèmes nuageux traversant le degré carré dans lequel s'inscrit notre zone d'étude.

Les objectifs de ce travail sont les suivants :

- Essayer de définir des domaines de températures caractéristiques d'un type de précipitation pluvieuse ou neigeuse.
- Essayer de définir de manière objective les amas nuageux responsables de l'essentiel des précipitations observées et caractérisées au sol.

4. Résultats et discussion

4.1. Conditions climatiques fixant la limite pluie neige

4.1.1. Individualisation et caractérisation d'événements

Les données présentées dans le chapitre précédent ont été traitées de la manière suivante.

Pour les deux périodes (janvier / février 1999 et décembre 1999 / mars 2000), les enregistrements météorologiques de la station Mévis à 4750 m d'altitude sont complétés avec des observations visuelles de terrain. Sur les enregistrements moyens demi-horaires, les précipitations observées au sol sont individualisées et caractérisées en pluie ou en neige. Dans un premier temps, nous travaillons sur des événements ayant des durées variables pour lesquels on a calculé les moyennes et noté les minima et maxima des températures, d'humidité et de radiation solaire incidente. Dans un deuxième temps, tous les enregistrements demi-horaires où l'on a une précipitation sont pris en compte, ce qui nous permet d'augmenter le nombre d'événements pluie et neige, et par conséquent la taille des échantillons. On espère ainsi préciser les tendances observées à partir des valeurs moyennes sur la durée des événements.

Nous regarderons d'abord les résultats sur la période du 1^{er} décembre 1999 au 31 mars 2000 puis nous comparerons avec ceux de la période du 11 janvier 1999 au 28 février 1999.

4.1.2. Analyse statistique, décembre 1999 / mars 2000

Evénements

Les statistiques des événements où l'on observe des précipitations, entre le 01/12/99 et le 31/03/00, sont reportées dans les Tableaux 1, 2 et 3. Le Tableau 1 consigne les caractéristiques de l'ensemble des événements et les Tableaux 2 et 3 concernent respectivement les événements pluie et neige.

| | Duree (hh:mm) | Temp. Min. (°C) | Temp. Max. (°C) | Temp. Moy. (°C) | Hum. Min. (%) | Hum. Max. (%) | Hum. Moy. (%) | Ray. Min. (W/m ²) | Ray. Max. (W/m ²) | Ray. Moy. (W/m ²) |
|----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Moyenne | 3:21 | 0,7 | 2,2 | 1,4 | 82,2 | 89,0 | 86,0 | 55 | 159 | 101 |
| Médiane | 2:30 | 0,5 | 1,8 | 1,1 | 86,4 | 91,3 | 89,0 | 16 | 82 | 48 |
| Mode | 1:30 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 90,4 | 92,3 | 81,4 | 0 | 0 | 0 |
| Écart- type | 2:26 | 1,6 | 2,0 | 1,7 | 11,5 | 5,5 | 7,8 | 74,61 | 181 | 118 |
| Variance | | 2,5 | 4,2 | 3,0 | 132,9 | 30,5 | 61,5 | 5567,21 | 32913 | 14052 |
| Plage | 13:30 | 8,4 | 9,7 | 8,4 | 63,8 | 27,8 | 34,7 | 343,00 | 815,00 | 608,25 |
| Minimum | 1:00 | -2,5 | -1,1 | -1,6 | 29,8 | 66,0 | 58,9 | 0,00 | 0 | 0 |
| Maximum | 14:30 | 5,9 | 8,6 | 6,8 | 93,6 | 93,8 | 93,7 | 343 | 815 | 608 |
| Nombre | 149 | 149 | 149 | 149 | 149 | 149 | 149 | 149 | 149 | 149 |

Tableau 1 : Caractéristiques climatiques des précipitations observées entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma.

| | Durée (hh:mm) | Temp. Min. (°C) | Temp. Max. (°C) | Temp. Moy. (°C) | Hum. Min. (%) | Hum. Max. (%) | Hum. Moy. (%) | Ray. Min. (W/m ²) | Ray. Max. (W/m ²) | Ray. Moy. (W/m ²) |
|----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Moyenne | 3:18 | 1,0 | 2,5 | 1,7 | 81,6 | 88,5 | 85,4 | 60 | 170 | 110 |
| Médiane | 2:30 | 0,7 | 2,3 | 1,5 | 85,6 | 90,8 | 88,2 | 17 | 99 | 55 |
| Mode | 1:30 | -0,3 | 0,9 | 0,8 | 90,4 | 92,6 | 81,4 | 0 | 0 | 0 |
| Écart- type | 2:34 | 1,6 | 2,1 | 1,7 | 11,9 | 5,9 | 8,3 | 77 | 188 | 125 |
| Variance | | 2,6 | 4,4 | 3,1 | 143,0 | 35,2 | 69,7 | 6020 | 35633 | 15652 |
| Plage | 13:30 | 8,4 | 9,7 | 8,0 | 63,8 | 27,8 | 34,7 | 343 | 815 | 608 |
| Minimum | 1:00 | -2,5 | -1,1 | -1,2 | 29,8 | 66,0 | 58,9 | 0 | 0 | 0 |
| Maximum | 14:30 | 5,9 | 8,6 | 6,8 | 93,6 | 93,8 | 93,7 | 343 | 815 | 608 |
| Nombre | 117 | 117 | 117 | 117 | 117 | 117 | 117 | 117 | 117 | 117 |

Tableau 2 : Caractéristiques climatiques des pluies observées entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma.

| | Durée (hh:mm) | Temp. Min. (°C) | Temp. Max. (°C) | Temp. Moy. (°C) | Hum. Min. (%) | Hum. Max. (%) | Hum. Moy. (%) | Ray. Min. (W/m ²) | Ray. Max. (W/m ²) | Ray. Moy. (W/m ²) |
|----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Moyenne | 3:31 | -0,2 | 1,2 | 0,4 | 84,1 | 90,6 | 88,2 | 38 | 122 | 70 |
| Médiane | 3:00 | -0,2 | 1,3 | 0,4 | 87,5 | 91,9 | 90,9 | 11 | 75 | 43 |
| Mode | 5:00 | 0,0 | 1,8 | -0,0 | 92,6 | 92,3 | #N/A | 0 | 0 | 0 |
| Écart- type | 1:54 | 0,9 | 1,4 | 1,0 | 9,5 | 3,2 | 5,0 | 58 | 141 | 81 |
| Variance | 0:09 | 0,9 | 2,0 | 1,0 | 91,3 | 10,6 | 25,5 | 3366 | 19896 | 6591 |
| Plage | 8:00 | 4,2 | 5,2 | 4,0 | 30,7 | 14,5 | 15,3 | 226 | 501 | 254 |
| Minimum | 1:00 | -2,5 | -0,7 | -1,6 | 62,4 | 79,2 | 77,9 | 0 | 0 | 0 |
| Maximum | 9:00 | 1,7 | 4,5 | 2,3 | 93,1 | 93,7 | 93,2 | 226 | 501 | 254 |
| Nombre | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |

Tableau 3 : Caractéristiques climatiques des chutes de neige observées entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma.

Durant ces quatre mois, 149 précipitations sont répertoriées : 117 de type pluie (77%), 35 de type neige (23%) et 4 mixtes attribuées aux deux catégories comme l'a fait Auer (1974), ce qui explique que la somme pluie plus neige soit supérieure au total des événements.

Ces événements ont des durées variables : de 1h à 14h30, mais en moyenne les événements pluie et neige durent 3h30 et ont la même médiane : 3h00. La durée des épisodes ne permet donc pas de distinguer le type de précipitations.

L'humidité relative de l'air est en moyenne identique pour les deux types d'événements : de l'ordre de 85%. Toutefois, les valeurs minimales pour la pluie sont plus faibles que pour la neige. Ces résultats semblent s'inscrire en contradiction avec ceux de Barry (1982) qui relève des humidités relatives faibles lorsque l'on a des chutes de neige à des températures positives. Toutefois, Barry utilise la température humide de l'air qui est mieux corrélée avec le type de précipitation observé que la température sèche. Dans notre étude, nous utilisons une température sèche, ce qui pourrait expliquer ces différences. On peut donc conclure en première approximation que l'humidité ne permet pas non plus de discriminer un type de précipitation plutôt qu'un autre.

En ce qui concerne le rayonnement solaire incident moyen, il est plus faible lorsqu'il neige que lorsqu'il pleut. Ceci s'explique très probablement par le fait que les heures de début et

de fin des chutes de neige interviennent plutôt la nuit, en moyenne entre 01h40 et 05h00, alors que les pluies surviennent plutôt l'après-midi, entre 14h40 et 18h00. Les heures données ici ne sont que des tranches indicatives que nous discuterons dans la partie 4.1.3.

La température de l'air reste la variable la plus discriminante pour l'occurrence de pluie ou de neige au sol.

L'étendue des plages de la température moyenne pour la pluie et la neige est respectivement de 8 et 4°C. La moyenne des températures pour la pluie est de +1,7°C contre +0,4°C pour la neige. La dispersion autour de la moyenne est plus importante pour la pluie (écart-type de 1.8°C) que pour la neige (écart-type de 1.0°C), ce qui montre que l'on observe de la pluie sur une gamme plus grande de température.

Il est intéressant de noter les corrélations qui existent entre ces trois variables climatiques. La corrélation entre les séries de température et d'humidité moyennes pour les événements neige est meilleure que pour les événements pluie : les coefficients de détermination R^2 sont respectivement de 0.7 ($n = 35$) et de 0.55 ($n = 117$). Pour la corrélation entre la température et le rayonnement incident, c'est l'inverse : R^2 de 0.65 pour les événements pluie et de 0.54 pour les événements neige.

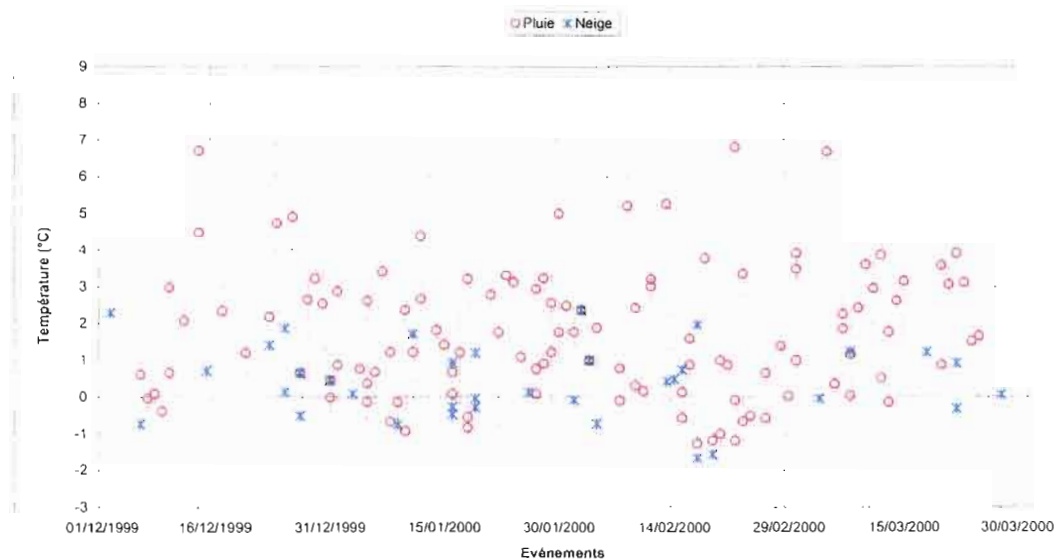


Figure 9 : Températures moyennes, minimales et maximales des événements pluie et neige. 01/12/99 - 31/12/00, Plataforma (4750 m).

Sur la Figure 9, on représente les événements pluie et neige observés au sol sur toute la période. Pour chaque événement, le cercle central indique la température moyenne sur toute sa durée et les barres d'erreurs les valeurs minimales et maximales. On voit que la distinction pluie - neige au sol à partir de cette variable climatique n'est pas évidente et qu'il est hasardeux de donner une valeur seuil de température qui serait déterminante pour fixer un type d'occurrence. On peut avoir des épisodes neigeux à des températures assez élevées : jusqu'à +4,5°C, et de la pluie à des températures assez basses : -2,5°C. Il existe

donc « une fourchette » de température à l'intérieur de laquelle coexistent ces deux types de précipitations.

La température étant une variable quantitative continue, il était plus commode de regrouper les événements en classes d'intervalle régulier de 1°C pour leur température moyenne. La détermination du nombre de classes s'est faite à partir du nombre d'événements et de l'étendue de la plage de données.

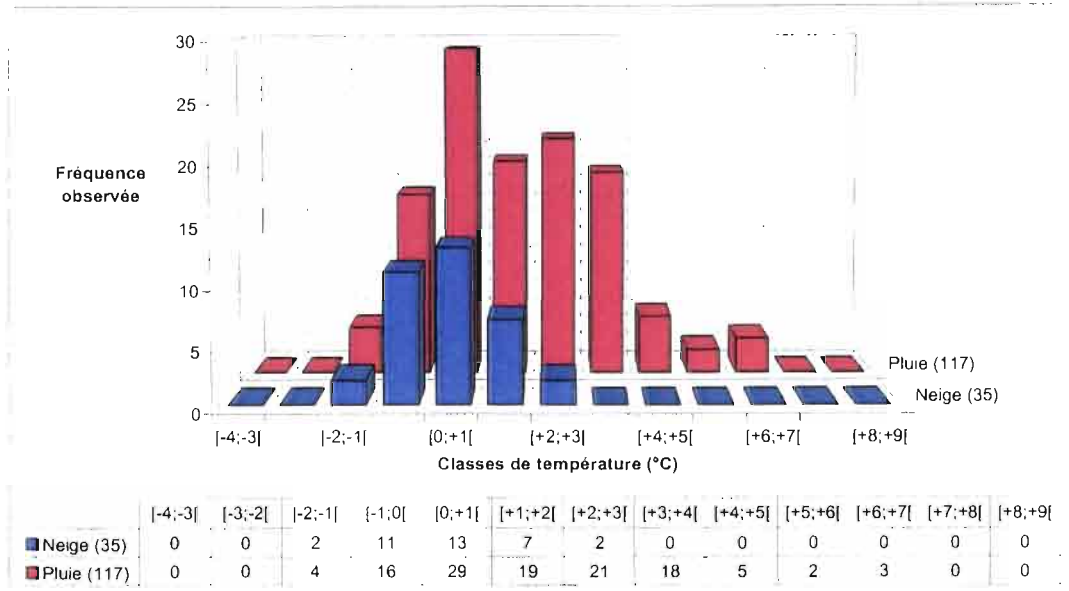


Figure 10 : Histogramme des fréquences des températures moyennes des événements regroupés par tranches de 1°C. 01/12/99 - 31/03/00, Plataforma.

L'histogramme des fréquences de la Figure 10 montre la distribution de la variable température pour les événements pluie et neige. Cette représentation graphique, par rapport à la précédente, permet de visualiser la répartition des types de précipitation par classe de température. On voit qu'il existe des températures où coexistent au sol l'occurrence de pluie et de neige : entre -2°C et $+3^{\circ}\text{C}$. Au-dessus de $+3^{\circ}\text{C}$, il n'y a plus d'événements neigeux, mais on peut observer de la pluie pour des températures négatives allant jusqu'à -2°C . Une grande partie des événements pluie est regroupée entre -1 et $+4^{\circ}\text{C}$, la classe de température $[0;+1]$ contenant le plus grand nombre d'individus. Pour la neige, l'essentiel des événements sont compris entre -1 et $+2^{\circ}\text{C}$, la classe $[0;+1]$ regroupant également le maximum d'individus. Ceci confirme l'idée qu'il n'est a priori pas évident de fixer une température seuil pour l'occurrence de pluie ou de neige au sol.

Sur la Figure 11, on représente les fréquences relatives cumulées pour les événements pluie et neige, par classement croissant des températures au sol. Il ne s'agit plus ici d'une distribution en classes mais une représentation continue des températures, ce qui donne une vision plus objective de la répartition des événements en fonction de celles-ci. Sur cette Figure, on constate qu'à une température de $+2^{\circ}\text{C}$, tous les événements neige ont été observés avec un niveau de confiance de 95%. A cette même température, on

comptabilise 60% de la pluie. La température à laquelle il n'y a plus d'événements neige observés au sol est de $+2.3^{\circ}\text{C}$. Nous choisissons de la définir comme **la température critique pour l'occurrence de la neige**. En dessous de -1°C , il n'y a pas d'événement pluie observé dans notre étude pour un niveau de confiance de 95%. En dessous de -1.7°C , il n'y a plus d'événements pluie. Ici, nous ne dirons pas qu'il s'agit de la température critique pour l'occurrence de pluie au sol car il est probable que les événements se produisant la nuit, à des températures moyennes inférieures à -1.7°C , ne soient pas tous bien caractérisés. Avec une meilleure observation des phénomènes nocturnes, on augmenterait certainement le nombre et la qualité de la caractérisation des événements « froids », notamment les épisodes neigeux (voir partie 4.1.3).

Il est utile de rappeler à l'occasion de l'interprétation de cette figure que les événements pluie et neige représentent respectivement 77 et 23% des événements totaux de précipitation et qu'il n'y a pas complémentarité des deux types de précipitations : les deux courbes de fréquences sont indépendantes.

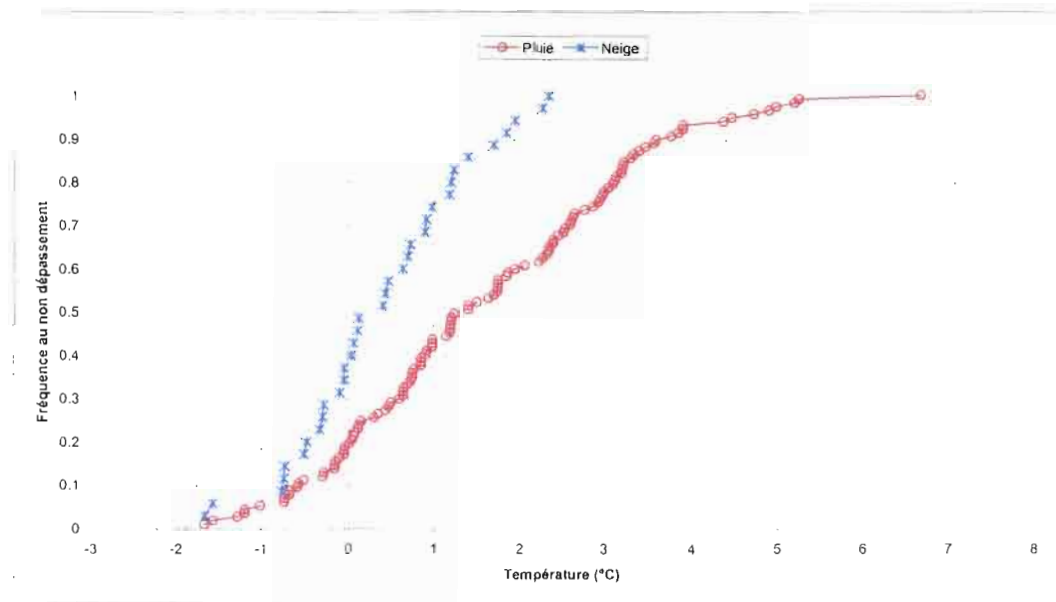


Figure 11 : Fréquence relatives cumulées des températures classées pour les événements pluie et neige. 01/12/99 - 31/03/00, Plataforma (4750 m).

Enregistrements demi-horaires

Après avoir analysé les événements de précipitations caractérisés par des valeurs moyennes, nous avons pris en compte tous les enregistrements pour lesquels on observe une précipitation : il s'agit des moyennes demi-horaires à la station Mévis. Le nombre d'observations est maintenant de 1039 : 807 pluie (78%), 232 neige (22%) et 14 mixtes. Les résultats de l'analyse statistique sont reportés dans les Tableaux 4, 5 et 6.

Les tendances observées précédemment sont retrouvées mais les valeurs sont plus précises.

L'étendue des plages de température augmente : 11.1°C pour la pluie, avec des valeurs comprises entre -2.5 et +8.6°C, et 7.1°C pour la neige avec des valeurs comprises entre -2.5 et +4.6°C. La température moyenne lorsqu'il pleut est de +1.3°C et de -0.3°C quand il neige.

Pour l'humidité, les valeurs moyennes sont très semblables pour les deux précipitations, les minimums sont plus faibles pour la pluie (30%) que pour la neige (62%).

Comme précédemment, les valeurs moyennes de rayonnement incident sont aussi plus fortes pour la pluie (85 W/m²) que pour la neige (42 W/m²).

| | Température air (°C) | Humidité (%) | Rayonnement (W/m ²) |
|---------------------------|----------------------|--------------|---------------------------------|
| Moyenne | 0,9 | 87,4 | 74 |
| Médiane | 0,6 | 91,3 | 0 |
| Mode | -0,1 | 92,6 | 0 |
| Écart-type | 1,8 | 8,5 | 123 |
| Variance de l'échantillon | 3,2 | 72,4 | 15362 |
| Plage | 11,1 | 64,1 | 815 |
| Minimum | -2,5 | 29,8 | 0 |
| Maximum | 8,6 | 93,9 | 815 |
| Nombre d'échantillons | 1025 | 1025 | 1025 |

Tableau 4 : Enregistrements (moyennes demi-horaires) pour lesquels on observe une précipitation entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma

| | Température air (°C) | Humidité (%) | Rayonnement (W/m ²) |
|---------------------------|----------------------|--------------|---------------------------------|
| Moyenne | 1,2 | 86,7 | 84 |
| Médiane | 1,0 | 90,8 | 5 |
| Mode | -0,1 | 92,2 | 0 |
| Écart-type | 1,8 | 9,0 | 131 |
| Variance de l'échantillon | 3,3 | 81,4 | 17413 |
| Plage | 11,1 | 64,0 | 815 |
| Minimum | -2,5 | 29,8 | 0 |
| Maximum | 8,6 | 93,8 | 815 |
| Nombre d'échantillons | 807 | 807 | 807 |

Tableau 5 : Enregistrements des moyennes demi-horaires pour lesquels on observe de la pluie entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma

| | Température air (°C) | Humidité (%) | Rayonnement (W/m ²) |
|---------------------------|----------------------|--------------|---------------------------------|
| Moyenne | -0,2 | 89,8 | 42 |
| Médiane | -0,3 | 91,9 | 0 |
| Mode | 0,0 | 92,6 | 0 |
| Écart-type | 1,1 | 5,8 | 80 |
| Variance de l'échantillon | 1,2 | 34,1 | 6515 |
| Plage | 7,1 | 31,5 | 501 |
| Minimum | -2,5 | 62,4 | 0 |
| Maximum | 4,6 | 93,9 | 501 |
| Nombre d'échantillons | 232 | 232 | 232 |

Tableau 6 : Enregistrements des moyennes demi-horaires pour lesquels on observe de la neige entre le 01/12/99 et le 31/03/00 à la Plataforma

Sur la Figure 12, aucune température responsable d'un type de précipitation plutôt qu'un autre ne se dégage. Par contre, deux domaines se distinguent assez bien : entre -3 et +1°C, la neige est très fréquente. Au-dessus de 0°C, la pluie est prépondérante. Il faut

cependant rappeler que l'échantillon pluie représente presque les ¾ des observations et qu'il faut donc relativiser l'importance d'un type de précipitation sur cette Figure.

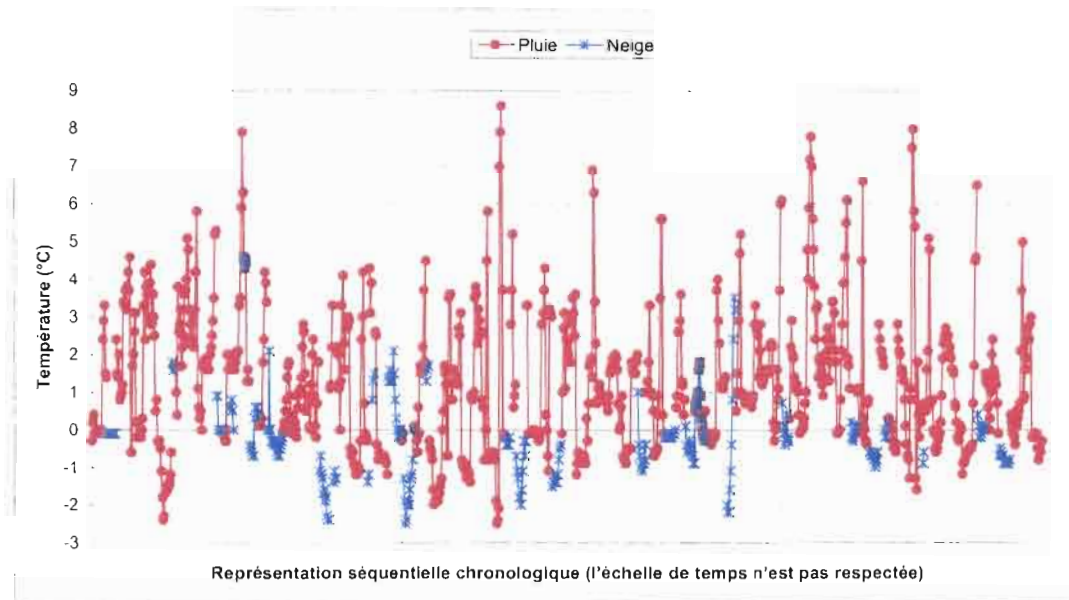


Figure 12 : Température moyenne demi-heure lorsque l'on observe une précipitation de type pluie ou neige. 01/12/99– 31/03/00, Plataforma.

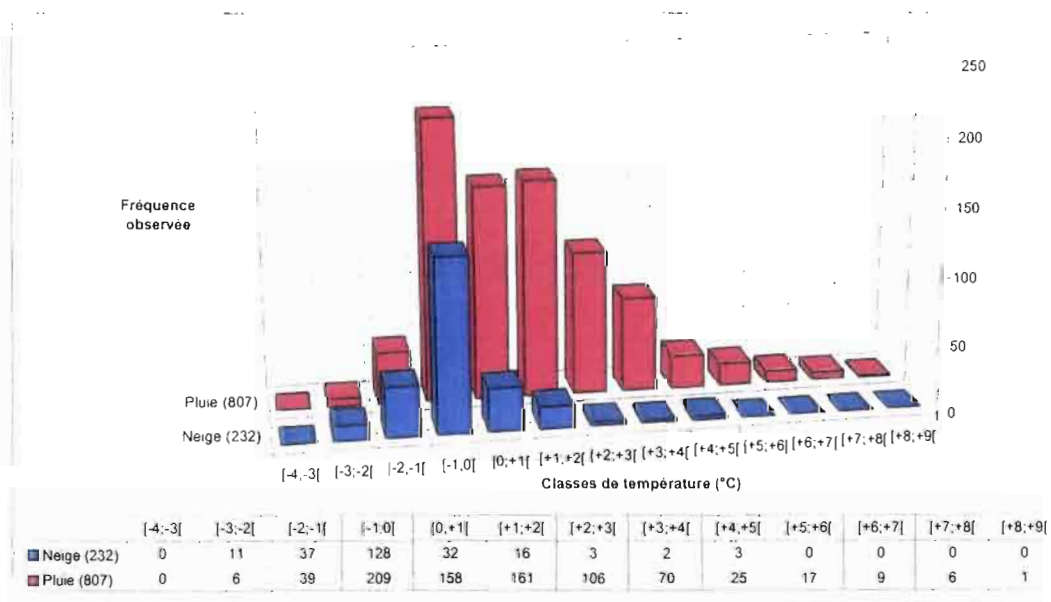


Figure 13 : Histogramme représentant la fréquence de pluie ou de neige observée par classe de température. 01/12/99 – 31/03/00, Plataforma

Sur la Figure 13 présentant l'histogramme de fréquence des enregistrements pluie ou neige, on remarque que c'est maintenant la classe de température [-1;0[qui regroupe le

maximum d'individus pour la neige, comme pour la pluie. L'allure des distributions est globalement inchangée : on étale juste la distribution en augmentant la taille de nos échantillons.

La Figure 14 montre les fréquences relatives cumulées d'occurrence de pluie ou neige pour les enregistrements demi-horaires. Ce que l'on a observé sur la Figure 13 se confirme ici : à 0°C on a déjà quasiment 80% de la distribution de la neige, alors que sur la Figure 11 à cette même température, on avait 40% seulement des événements neige ; il fallait atteindre +1.2°C pour avoir 80% de la distribution.

La **température critique pour l'occurrence de la neige au sol** est maintenant de +4.5°C (+2.3°C pour les événements neige) et de -2.5°C pour la pluie (-1.7°C pour les événements pluie).

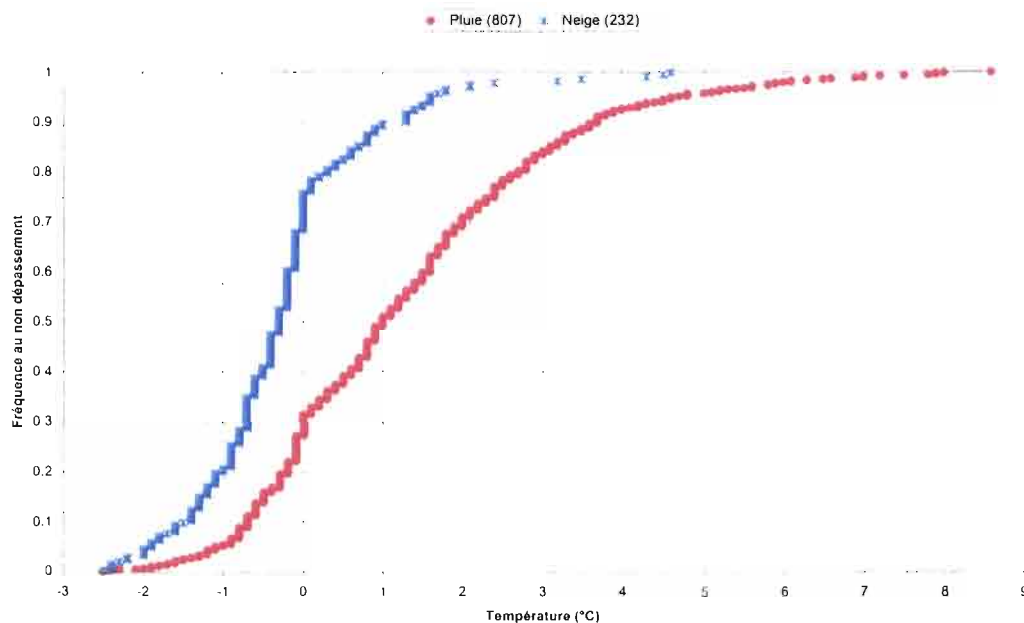


Figure 14 : Fréquences relatives cumulées des températures classées pour les enregistrements pluie et neige. 01/12/99 – 31/03/00, Plataforma.

Pour terminer l'analyse de la première période (saison humide 99/00), nous avons calculé la fréquence relative d'occurrence de pluie ou de neige par classe de température d'intervalle 1°C.

C'est ce que nous représentons sur la Figure 15. Cela revient à calculer la probabilité d'occurrence de pluie ou de neige, mais il est préférable de parler de fréquence puisque les individus par classe sont parfois peu nombreux et les observations non infinies.

Cette fois, on a une analyse conjointe de la pluie et de la neige : dans la classe de température $[-1;0[$, la fréquence relative d'occurrence pour la neige est de 0.38 et celle de la pluie 0.62. Pour une température comprise dans la classe $[-2;-1[$, on a une probabilité égale d'avoir de la pluie ou de la neige. Pour des températures plus chaudes, la probabilité pour que la précipitation dominante soit de la pluie augmente. Sa fréquence relative

d'occurrence est de 95% dans la classe [+3;+4[. Au-delà de la classe [+4;+5[, il n'y a jamais de neige. La température critique de l'air pour l'occurrence de neige au sol est donc comprise entre +4°C et +5°C. La même analyse réalisée pour des classes d'intervalle plus petit, 0.5 et 0.25°C, nous a montrée qu'elle se situe plus précisément entre +4.5 et +4.75°C. Cela correspond bien aux résultats présentés sur la Figure 15.

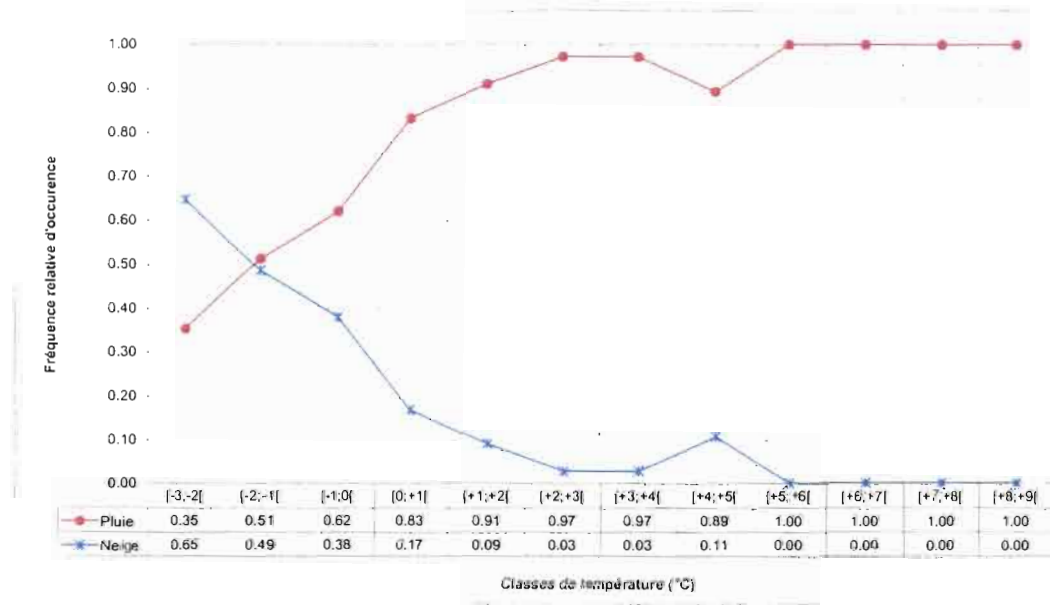


Figure 15 : Fréquence relative d'occurrence de pluie ou de neige par classe de température d'intervalle 1°C. 01/12/99 - 31/03/00, Plataforma (4750 m)

La Figure 15 est expérimentale, c'est pourquoi elle n'est pas « lissée » et monotone comme la courbe théorique proposée par Auer (1974), Figure 5. En documentant plus précisément ce qui se passe à des températures plus froides notamment la nuit, on constaterait certainement préférentiellement de la neige plutôt que de la pluie. On devrait obtenir une allure semblable à celle de la courbe théorique d'Auer.

Si on regarde la répartition des événements pluie et neige par classe de température (Figure 13), on note que les tailles d'échantillons sont très différentes. Les classes n'ont donc pas le même « poids » : on peut accorder une plus grande fiabilité à une fréquence relative calculée lorsque la taille de l'échantillon est grande, mais il n'existe pas de coefficient de pondération pour prendre en compte cette répartition différente. Pour lisser cette courbe, il faudrait calculer l'intervalle de confiance sur la fréquence par classe en fonction de l'effectif de chaque classe, en considérant les classes comme indépendantes.

4.1.3. Analyse statistique janvier / février 1999

A titre de comparaison, on présente maintenant les résultats pour une autre période : du 11/01/99 au 28/02/99. Les données disponibles ne couvrent pas toute la saison des pluies puisqu'elles n'ont été traitées que pour nous permettre de croiser une information sol avec une information satellitale disponible seulement à ces dates. Il faut souligner que les observations visuelles sont nettement moins bien documentées au sol sur cette deuxième période.

Evénements

On reporte dans les Tableaux 7, 8 et 9 les statistiques des événements où l'on observe des précipitations. Le Tableau 7 consigne les caractéristiques de l'ensemble des événements pluvieux observés et les Tableaux 8 et 9 concernent ensuite respectivement les événements pluie et neige.

| | Durée (Heure) | Temp. Min. (°C) | Temp. Max. (°C) | Temp. Moy. (°C) | Hum. Min. (%) | Hum. Max. (%) | Hum. Moy. (%) | Ray. Min. (W/m ²) | Ray. Max. (W/m ²) | Ray. Moy. (W/m ²) |
|----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Moyenne | 4:48 | 0,6 | 2,3 | 1,4 | 84,5 | 90,2 | 88,2 | 60 | 187 | 105 |
| Médiane | 3:00 | 0,6 | 2,2 | 1,2 | 86,2 | 91,5 | 89,9 | 6 | 186 | 73 |
| Mode | 3:00 | 1,0 | 0,8 | 0,1 | 91,4 | 91,9 | 91,4 | 0 | 0 | 0 |
| Écart- type | 3:36 | 1,3 | 1,5 | 1,3 | 7,6 | 2,6 | 4,5 | 74 | 174 | 114 |
| Variance | 0:32 | 1,7 | 2,3 | 1,7 | 59,0 | 6,8 | 20,7 | 5571 | 30424 | 13104 |
| Plage | 16:00 | 6,3 | 8,1 | 7,2 | 37,1 | 15,5 | 30,1 | 245 | 806 | 598 |
| Minimum | 1:00 | -2,2 | -0,2 | -0,5 | 55,6 | 77,3 | 62,5 | 0 | 0 | 0 |
| Maximum | 17:00 | 4,1 | 7,9 | 6,6 | 92,7 | 92,8 | 92,7 | 245 | 806 | 598 |
| Nombre | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |

Tableau 7 : Ensemble des événements "pluvieux" individualisés. 11/01/99 - 28/02/99, Plataforma.

| | Durée (Heure) | Temp. Min. (°C) | Temp. Max. (°C) | Temp. Moy. (°C) | Hum. Min. (%) | Hum. Max. (%) | Hum. Moy. (%) | Ray. Min. (W/m ²) | Ray. Max. (W/m ²) | Ray. Moy. (W/m ²) |
|----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Moyenne | 4:32 | 0,7 | 2,3 | 1,4 | 84,4 | 90,2 | 88,2 | 62 | 186 | 107 |
| Médiane | 3:00 | 0,6 | 2,2 | 1,2 | 86,2 | 91,5 | 89,9 | 9 | 179 | 73 |
| Mode | 3:00 | 1,0 | 0,8 | 0,1 | 91,4 | 91,9 | 91,4 | 0 | 0 | 0 |
| Écart- type | 3:17 | 1,3 | 1,5 | 1,3 | 7,8 | 2,6 | 4,6 | 75 | 177 | 116 |
| Variance | 0:27 | 1,7 | 2,4 | 1,8 | 61,1 | 7,0 | 21,4 | 5715 | 31392 | 13593 |
| Plage | 15:00 | 6,3 | 8,1 | 7,2 | 37,1 | 15,5 | 30,1 | 245 | 806 | 598 |
| Minimum | 1:00 | -2,2 | -0,2 | -0,5 | 55,6 | 77,3 | 62,5 | 0 | 0 | 0 |
| Maximum | 16:00 | 4,1 | 7,9 | 6,6 | 92,7 | 92,8 | 92,7 | 245 | 806 | 598 |
| Nombre | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 |

Tableau 8 : Evénements pluie caractérisés. 11/01/99 - 28/02/99, Plataforma.

| | Durée (Heure) | Temp. Min. (°C) | Temp. Max. (°C) | Temp. Moy. (°C) | Hum. Min. (%) | Hum. Max. (%) | Hum. Moy. (%) | Ray. Min. (W/m ²) | Ray. Max. (W/m ²) | Ray. Moy. (W/m ²) |
|----------------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Moyenne | 8:48 | -0,0 | 2,9 | 1,2 | 80,8 | 91,0 | 88,5 | 15 | 216 | 55 |
| Médiane | 8:30 | -0,2 | 2,8 | 1,0 | 81,6 | 91,4 | 88,4 | 0 | 245 | 38 |
| Mode | | | | | | | | | | |
| Écart- type | 5:32 | 1,1 | 0,8 | 0,7 | 8,8 | 1,6 | 2,3 | 37 | 184 | 55 |
| Variance | 1:16 | 1,3 | 0,6 | 0,4 | 78,3 | 2,8 | 5,6 | 1434 | | 3091 |
| Plage | 15:00 | 2,9 | 2,2 | 1,9 | 25,3 | 5,4 | 7,4 | 109 | 558 | 149 |
| Minimum | 2:00 | -1,5 | 1,8 | 0,2 | 65,6 | 87,0 | 83,8 | 0 | 0 | 0 |
| Maximum | 17:00 | 1,4 | 4,0 | 2,1 | 90,9 | 92,4 | 91,3 | 109 | 558 | 149 |
| Nombre | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

Tableau 9 : Evénements neige caractérisés. 11/01/99 - 28/02/99, Plataforma.

Entre le 11 janvier 1999 et le 28 février 1999, 70 événements de précipitations sont individualisés : 66 ont été caractérisés comme de la pluie, 8 comme de la neige et 4 sont mixtes et ont été attribués aux deux catégories.

L'analyse statistique réalisée montre que les tendances observées sur la période précédente sont confirmées. Ces événements ont des durées très variables : de 1h à 17h. Par contre, il semble que les 8 périodes de neige aient des durées significativement plus longues que celles de pluie.

La moyenne des valeurs d'humidité pour les événements pluie et neige est sensiblement identique (88%) mais la valeur minimale moyenne est plus faible lorsqu'il pleut (62.5%) que lorsqu'il neige (83%).

Pour les valeurs de rayonnement incident moyen, il est beaucoup plus faible pour les événements neige (55 W/m²) que pour les événements pluie (107 W/m²).

Quant aux températures moyennes, elles ont également une plage plus étendue pour la pluie (7.2°C) que pour la neige (1.9°C). Les moyennes sont proches : +1.4°C pour la pluie, +1.24°C pour la neige. Par contre on observe les températures les plus froides pour les événements pluie : -2.2°C alors qu'elles n'atteignent que -1.5°C pour la neige. Ces résultats sont différents de ceux de la période précédente, mais sur celle-ci, on individualise trop peu d'événements neige pour pouvoir donner des caractéristiques moyennes valides.

Enregistrements demi-horaires

Les enregistrements demi-horaires pour lesquels on a observé une précipitation permettent de mieux faire ressortir les caractéristiques climatiques responsables de l'occurrence de pluie ou de neige. Sur les 668 enregistrements maintenant disponibles, 558 correspondent à de la pluie, 143 à de la neige et 43 appartiennent à ces deux catégories (Tableaux 4, 5 et 6).

| | Température air (°C) | Humidité (%) | Rayonnement (W/m ²) |
|---------------------------|----------------------|--------------|---------------------------------|
| Moyenne | 1,0 | 88,9 | 71 |
| Médiane | 0,7 | 91,3 | 0 |
| Mode | 0,0 | 91,5 | 0 |
| Écart-type | 1,3 | 5,1 | 117 |
| Variance de l'échantillon | 1,8 | 26,4 | 13800 |
| Plage | 10,1 | 37,2 | 806 |
| Minimum | -2,2 | 55,6 | 0 |
| Maximum | 7,9 | 92,8 | 806 |
| Nombre d'échantillons | 668 | 668 | 668 |

Tableau 10 : Enregistrements (moyennes demi-horaires) pour lesquels on observe une précipitation entre le 11/01/99 et le 28/02/99.

| | Température air (°C) | Humidité (%) | Rayonnement (W/m ²) |
|---------------------------|----------------------|--------------|---------------------------------|
| Moyenne | 1,0 | 88,9 | 74 |
| Médiane | 0,7 | 91,3 | 0 |
| Mode | 0,0 | 91,9 | 0 |
| Écart-type | 1,3 | 5,2 | 122 |
| Variance de l'échantillon | 1,9 | 27,0 | 15003 |
| Plage | 9,3 | 37,2 | 806 |
| Minimum | -1,4 | 55,6 | 0 |
| Maximum | 7,9 | 92,8 | 806 |
| Nombre d'échantillons | 568 | 568 | 568 |

Tableau 11 : Enregistrements (moyennes demi-horaires) pour lesquels on observe de la pluie entre le 11/01/99 et le 28/02/99, Plataforma.

| | Température air (°C) | Humidité (%) | Rayonnement (W/m ²) |
|---------------------------|----------------------|--------------|---------------------------------|
| Moyenne | 0,7 | 88,9 | 58 |
| Médiane | 0,9 | 91,3 | 1 |
| Mode | 1,4 | 91,7 | 0 |
| Écart-type | 1,2 | 5,1 | 103 |
| Variance de l'échantillon | 1,6 | 26,7 | 10776 |
| Plage | 6,2 | 26,5 | 558 |
| Minimum | -2,2 | 65,6 | 0 |
| Maximum | 4,0 | 92,1 | 558 |
| Nombre d'échantillons | 143 | 143 | 143 |

Tableau 12 : Enregistrements (moyennes demi-horaires) pour lesquels on observe de la neige entre le 11/01/99 et le 28/02/99, Plataforma.

Les résultats obtenus sont maintenant en accord avec ceux de la première période. Pour l'humidité relative, la moyenne et les maxima sont identiques pour la pluie et la neige : respectivement 89 et 92%. Par contre, pour les minima les valeurs sont plus faibles lorsqu'il pleut (55.6%) que lorsqu'il neige (65.6%).

Pour le rayonnement incident, c'est la même chose : moyenne et maxima plus faibles pour la neige (58 et 558 W/m²) que pour la pluie (74 et 806 W/m²).

Pour les températures, la plage est plus étendue pour la pluie (9.3°C) que pour la neige (6.2°C). Les valeurs moyennes, minimales et maximales sont plus faibles pour la neige que pour la pluie.

Tout ceci est représenté sur la Figure 16. Par rapport à la Figure 12, les enregistrements où l'on observe de la neige à des températures assez élevées sont plus nombreux. Il est plus difficile de délimiter deux ensembles pluie et neige.

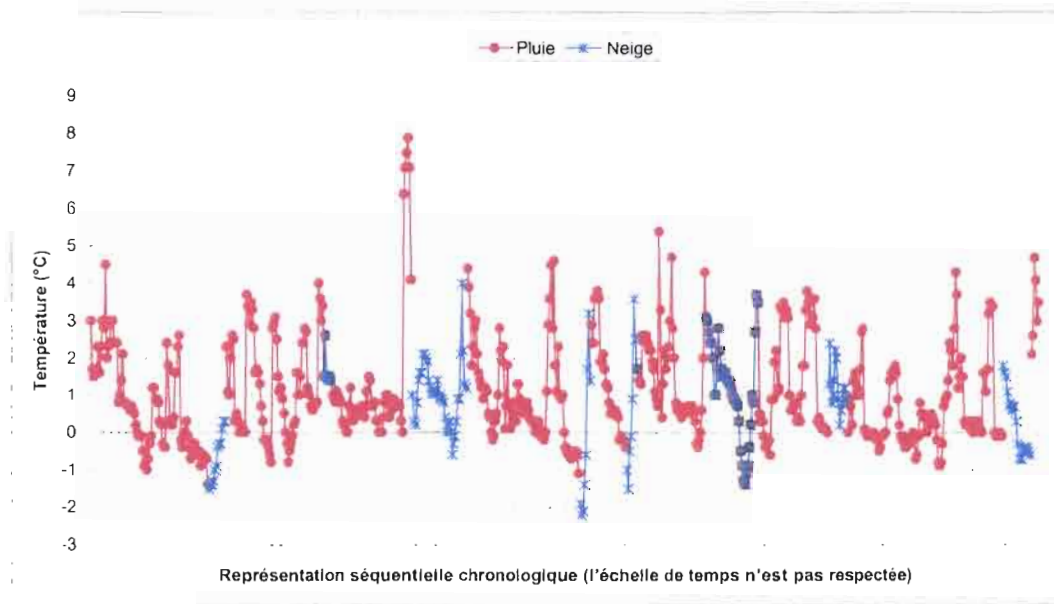


Figure 16 : Température moyenne demi-horaire lorsque l'on observe une précipitation de type pluie ou neige. 11/01/99 – 28/02/99, Plataforma.

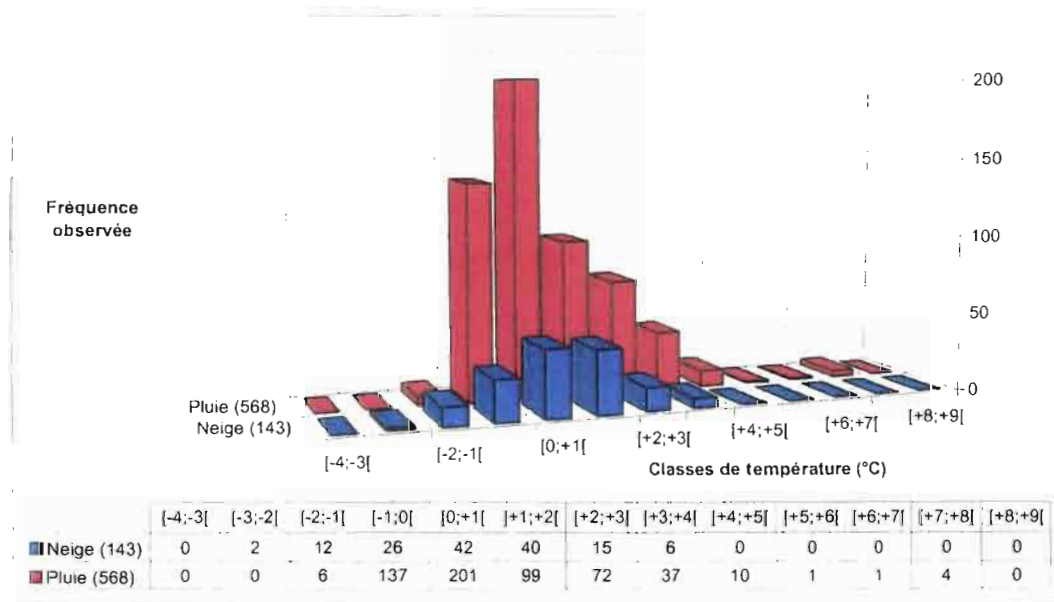


Figure 17 : Histogramme représentant la fréquence de pluie ou neige observée par classe de température. 11/01/99 – 28/02/99, Plataforma

La Figure 17 représente l'histogramme des fréquences des enregistrements pluie et neige par classe de température d'intervalle 1°C. Les classes de température qui contiennent le maximum d'échantillon neige sont les classes [0;+1[et [+1;+2[, alors que pour la première période c'était la classe [-1;0[. Pour la pluie c'est la même chose : c'est également la classe [0;+1[qui contient maintenant le maximum d'échantillons. Par contre les distributions pluie et neige semblent moins étalées : répartitions des valeurs de -2°C à +8°C pour la pluie (de -3°C à +9°C sur la période précédente) et de -3°C à +4°C pour la neige (-3°C à +5°C sur l'autre période).

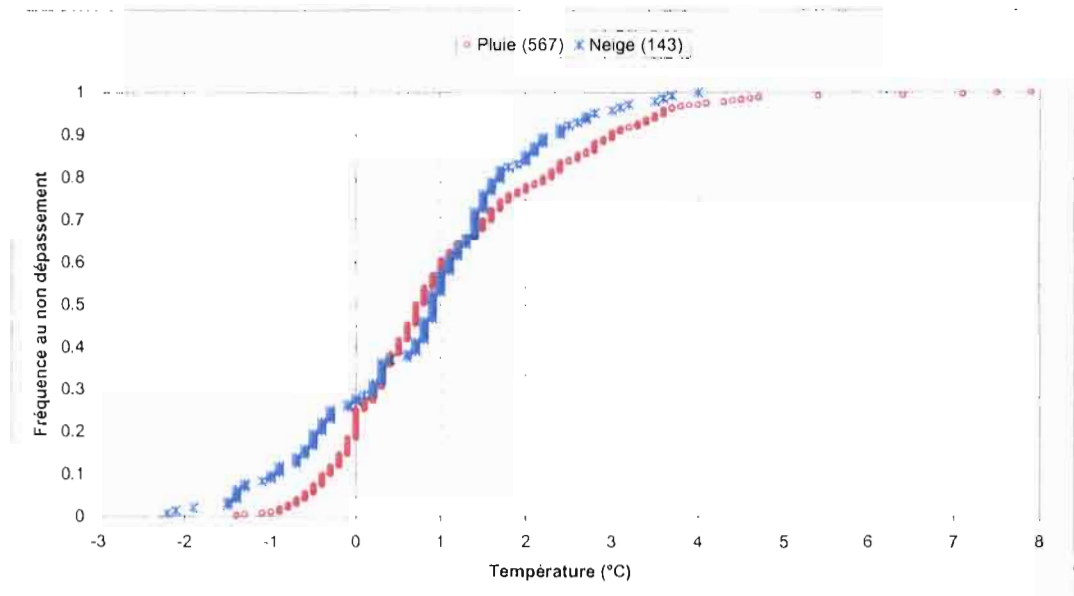


Figure 18 : Températures moyennes demi-horaires classées. 11/01/99 – 28/02/99, Plataforma.

Sur la Figure 18, au-delà de +4°C il n'est pas observé de neige au sol, pas de pluie en deçà de -1.5°C. Ce sont les températures critiques pour l'occurrence de neige ou de pluie au sol. Elles sont du même ordre de grandeur que pour la première période : +2.3°C pour les événements neige, +4.5°C pour les enregistrements moyens demi-horaires neige, -1.7°C pour les événements pluie et -2.5°C pour les enregistrements moyens demi-horaires pluie.

Sur la Figure 19 on présente les fréquences relatives d'occurrence de pluie ou de neige au sol par classe de température. Pour une température comprise entre -2°C et -1°C, la probabilité d'avoir de la pluie ou de la neige est égale. La probabilité d'avoir de la pluie augmente avec la température. Au-delà de la classe [+3;+4[, on n'observe plus de neige. La température critique de l'air pour l'occurrence de neige au sol est donc comprise dans cette classe. Sur la Figure 18, nous avons trouvé +4°C.

En comparant des données de deux saisons des pluies, on constate que même si la distribution des événements ou des enregistrements où l'on observe des précipitations est différente, les températures critiques sont très similaires.

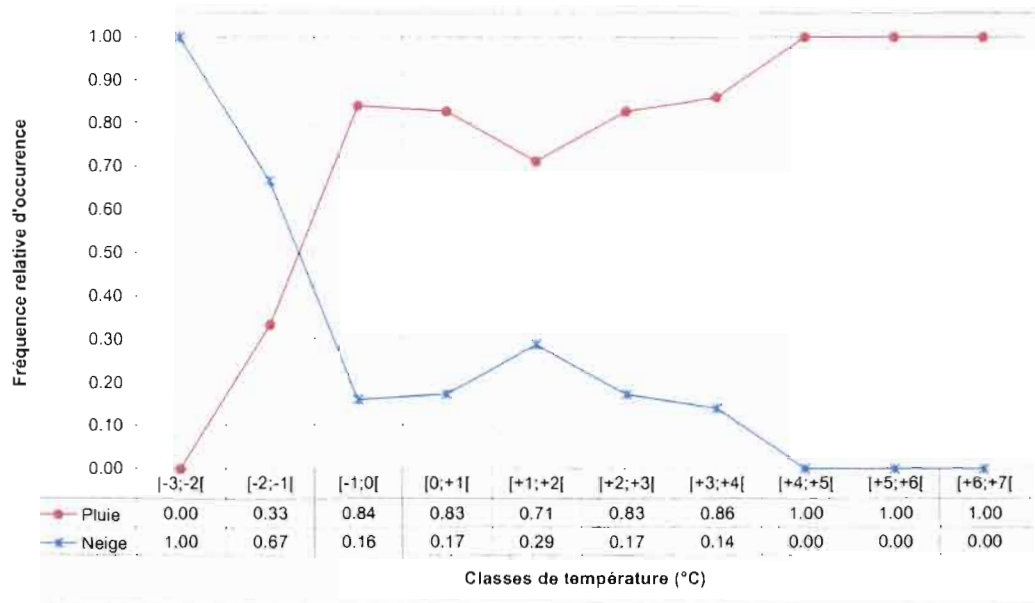


Figure 19 : Fréquence relative d'occurrence de pluie ou de neige par classe de température d'intervalle 1°C. 11/01/99 - 28/02/99, Plataforma (4750 m).

4.1.4. Discussion

Les résultats obtenus dans cette étude sont intéressants puisqu'ils permettent de préciser les rares travaux existants pour des régions très différentes. La température critique de l'air au sol pour l'occurrence de neige à la surface est de +4.5°C, soit inférieure de 1.6°C à la valeur définie par Auer (1974). On voit que l'applicabilité d'une telle température seuil est inhérentes aux caractéristiques physiques et climatiques de la zone d'étude.

Ces premiers résultats propres à notre zone pourraient être complétés et améliorés. Dans la partie 3.1.1.2 *Critique des données*, on a commenté le caractère subjectif des données visuelles de terrain : incertitude sur l'existence, la sous-estimation des précipitations la nuit, difficulté de les caractériser lorsqu'elles existent. Des imprécisions, aussi bien quantitatives que qualitatives, subsistent donc.

Nous présentons sur la Figure 20 le cumul demi-horaire des pluies pour la période du 01/12/99 au 31/03/00 à 4830 m au niveau de la station pluviométrique décrite dans la partie 3.1.2. et au poste de Liviñosa situé plus bas dans le bassin versant du Rio Zongo (4000 m). On met ainsi en évidence les périodes de la journée qui reçoivent préférentiellement les précipitations.

Tout d'abord, on remarque que les deux pics de la Plataforma et de Liviñosa sont décalés dans le temps : à la Plataforma, il n'y a pas de précipitations la nuit de 01h00 à 06h00 du matin, puis entre 07h00 et 10h00 les précipitations sont maximales. Après 10h00 et jusqu'au milieu de la nuit, les cumuls diminuent. Les observations visuelles de terrain et l'heure moyenne de début et fin des événements tendent à montrer qu'il y aurait au contraire des précipitations nocturnes. Dans la vallée à Liviñosa (Figure 3), les enregistrements sont différents : on observe deux pics de précipitations, un en milieu de journée, l'autre la nuit. De 09h00 à 13h00, les cumuls sont croissants, puis diminuent

jusqu'à 21h00 où l'on observe à nouveau des précipitations. Le cumul est maximum vers minuit puis il décroît lentement jusqu'au petit matin.

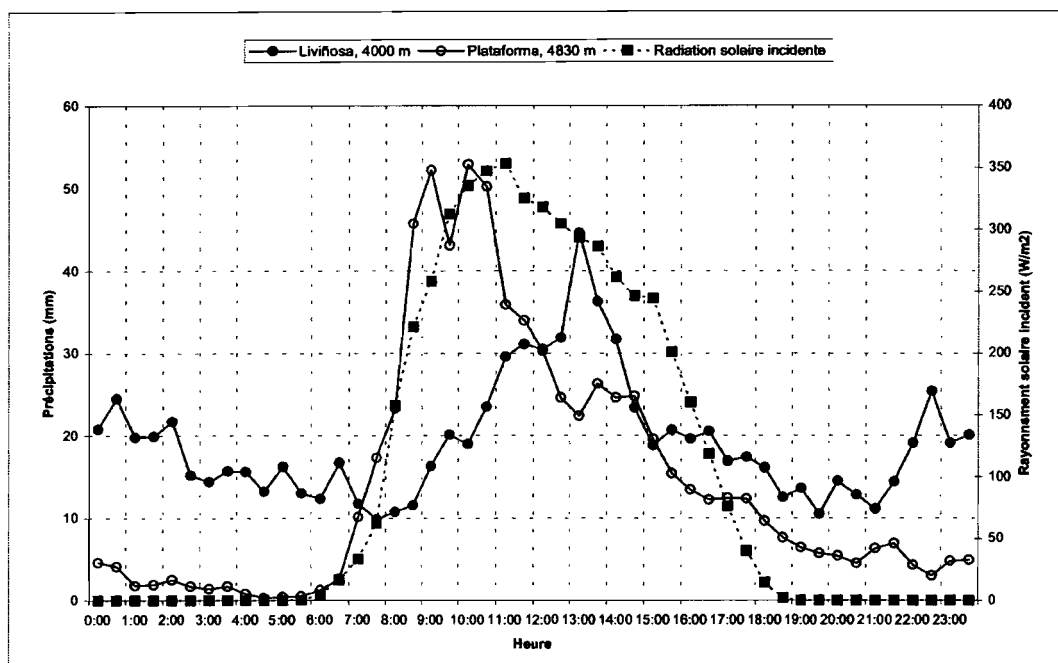


Figure 20 : Répartition des pluies et du rayonnement solaire incident au cours de la journée. Cumuls (précipitations) et moyennes (rayonnement) demi-horaires sur la période du 01/12/99 au 31/03/00. Plataforma (4830 m) et Liviñosa (4000 m)

Ces comportements différents peuvent s'expliquer par la position géographique des deux sites et la variabilité spatiale des précipitations. Mais ils sont aussi certainement liés au type de précipitation qu'enregistrent les pluviomètres à augets. A la Plataforma, on peut penser que la nuit la précipitation est souvent de type neige et qu'elle n'est pas, ou mal, comptabilisée : en effet elle peut se stocker dans le cône de réception sous forme solide et n'être enregistrée comme précipitation que lorsque le rayonnement apparaît au lever du soleil vers 06h30 (Figure 20). La fonte de cette « masse » de neige accumulée la nuit provoquerait un *pic de précipitation* sur l'enregistrement de 07h00 à 10h00 à la Plataforma.

On ne sait donc pas précisément si l'on observe des précipitations la nuit. L'autre question est la caractérisation des précipitations se produisant la nuit à un moment où les observations visuelles ne sont pas disponibles : pluie ou neige ? Cette question ne peut pas être tranchée pour l'instant, mais cette indétermination devrait être levée dans l'avenir avec l'installation d'un nouveau pluviomètre enregistreur adapté à la collecte de neige.

4.2. Systèmes nuageux et précipitations neigeuses

4.2.1. Résultats

Les données satellitales utilisées ont été présentées dans les parties 3.1.1 et 3.2.4. On croise ces informations satellitales avec une information sol. Nos données sol correspondent à des enregistrements météorologiques demi-horaires auxquels on a fait correspondre le type de précipitation observé et caractérisé au sol. Nos données satellitales correspondent aux enregistrements demi-horaires où des nuages à sommets froids sont détectés. Les informations suivantes sont disponibles :

- naissance de l'amas (par division ou par naissance spontanée), disparition, dissipation
- taille de l'amas nuageux aux deux seuils de température 235 et 210°K
- taille de l'amas nuageux ayant touché le degré carré auquel appartient notre zone d'étude, autrement dit le nombre de pixels détectés
- vitesse moyenne des amas nuageux
- rayon moyen des systèmes nuageux
- leur durée de vie
- leurs coordonnées géographiques

On filtre nos données satellitales pour ne garder que les enregistrements qui ont une équivalence temporelle au sol, en s'assurant qu'au moins un pixel de l'amas nuageux a intercepté une zone d'un degré dont le centre est la station Mévis à la Plataforma (Long : 68°10'W, Lat : 16°15'S). Le choix de cette zone a été motivé par la taille moyenne des amas nuageux que l'on peut suivre (taille supérieure à 5000 km²). De plus, elle couvre intégralement notre zone d'observation au sol, ainsi qu'une partie des Yungas et de l'Altiplano. Ceci nous permet d'avoir une vision d'ensemble des phénomènes responsables des précipitations sur notre zone d'étude, de l'échelle régionale à l'échelle locale.

Sur les 49 jours que compte notre période d'étude (11 janvier 1999 -28 février 1999), 44 ont été pluvieux. Le cumul des précipitations à la Plataforma est de 163.5 mm. Au sol, 70 événements pluvieux ont été caractérisés, représentant 669 enregistrements demi-horaires. En parallèle, 28 événements *satellitiaux* ont été retenus : ils ont touché notre degré carré à des heures où des précipitations ont été observées au sol. Ces 28 événements correspondent à 350 enregistrements demi-horaires que l'on met en correspondance avec les 669 événements sol. Finalement, ce sont 208 données croisées qui sont retenues et utilisées, soit 31% des données sol de départ et 59% des données satellitales. 24 jours de pluie (54% des jours totaux de pluie) ont trouvé une correspondance avec l'information satellitale, totalisant 94.5 mm de précipitations (58% du total cumulé).

Tous les événements de précipitation observés au sol n'ont pas été détectés par le satellite. Plusieurs raisons à cela : des amas nuageux peuvent être considérés comme distincts par le satellite alors qu'ils sont certainement à rattacher à d'autres plus gros, responsables de précipitations. De même, toutes les observations satellitales ne donnent pas lieu à des événements pluvieux au sol, la présence de nuages n'impliquant pas nécessairement que l'on ait des précipitations (Figure 21 où sont représentées les précipitations journalières à la Plataforma ainsi que la moyenne journalière du nombre de

pixels ayant interceptés le degré carré). De plus, les nuages détectés s'ils sont de petites tailles n'ont peut être qu'effleuré la zone ou engendrés des précipitations loin de notre station pluviométrique.

Ainsi, 40% des événements enregistrés au sol et 58% du volume précipité sont détectés et expliqués avec cette méthode de suivi des amas nuageux, les 60% d'événements non détectés ne représentant finalement que 42% des précipitations. Compte tenu de l'étendue de la zone d'interception des amas nuageux (environ 12000 km²) et du caractère ponctuel de nos observations sol à la Plataforma, ce premier résultat est satisfaisant. Quant aux améliorations inhérentes à la méthode de suivi des amas nuageux que l'on pourrait apporter, elles seront discutées plus loin.

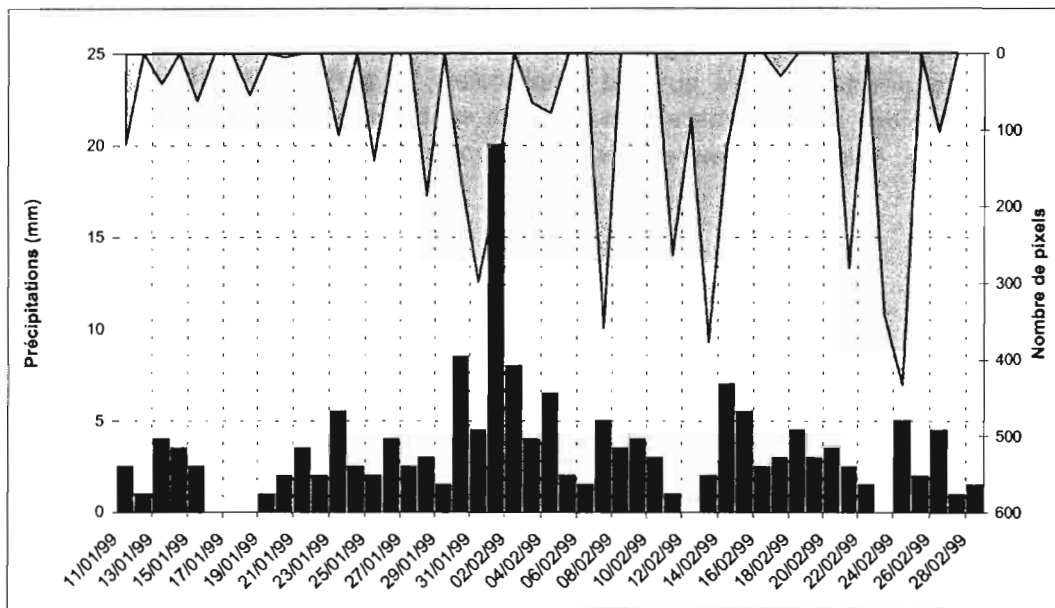


Figure 21 : Précipitations journalières à la Plataforma et nombre moyen journalier de pixels détectés sur le degré carré. 11/01/99 - 28/02/99.

Notre jeu de données résultant des informations croisées sol – satellite nous fournit des indications intéressantes.

Sur la Figure 22, on représente le nombre de pixels moyen demi-horaires ayant touché le degré carré et donné des précipitations du 11 janvier 99 au 28 février 99. Le nombre de pixels détectés traduit la taille de la couverture nuageuse. Une bonne correspondance entre les précipitations demi-horaires moyennes enregistrées à la Plataforma et la couverture nuageuse sur le degré carré existe. Ce comportement des nuages sur cette zone est bien connu (Wagnon, 1999, Aceituno, 1996) mais c'est la première fois que ce type de suivi est utilisé.

Un autre résultat intéressant peut être obtenu à partir de ces nouvelles données : sur les Figures 23, la position des lieux de naissance des amas nuageux ayant touché le degré carré et donné des précipitations à la Plataforma est représentée. Les trajectoires sont indiquées sur la figure du haut et la figure du bas donne une représentation géographique

des observations à une échelle régionale. Le degré carré est également représenté. Les deux types de naissance des amas sont distingués : par division ou par naissance spontanée.

Deux tiers des amas nuageux responsables des précipitations observées à la Plataforma naissent au nord-est, en Amazonie, et le tiers restant au sud-est dans les vallées subandines et au sud sur l'altiplano. Les provenances peuvent être lointaines ou locales, ce qui peut laisser penser qu'il existe deux régimes de masse d'air. Les trajectoires semblent un peu confuses, mais elles indiquent que les systèmes ne sont pas propagatifs comme on l'observe en Afrique de l'Ouest par exemple (Mathon, 2001) : pas de direction ni de sens particulier, les amas bougent, grossissent et restent largement influencés par les barrières orographiques que constituent les cordillères. Cette représentation des lieux de naissances et des trajectoires des amas nuageux responsables des précipitations dans notre zone de la cordillère orientale montre qu'il est simplificateur de parler d'une seule provenance amazonienne des masses d'air et que la réalité est beaucoup plus complexe. Il faudrait étendre cette étude sur d'autres années hydrologiques pour pouvoir confirmer ces résultats.

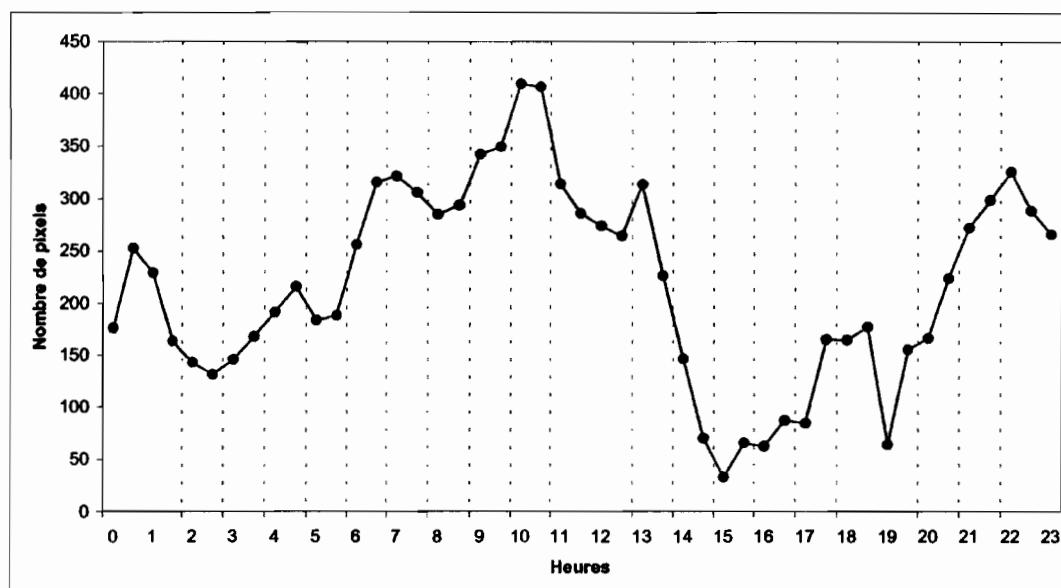
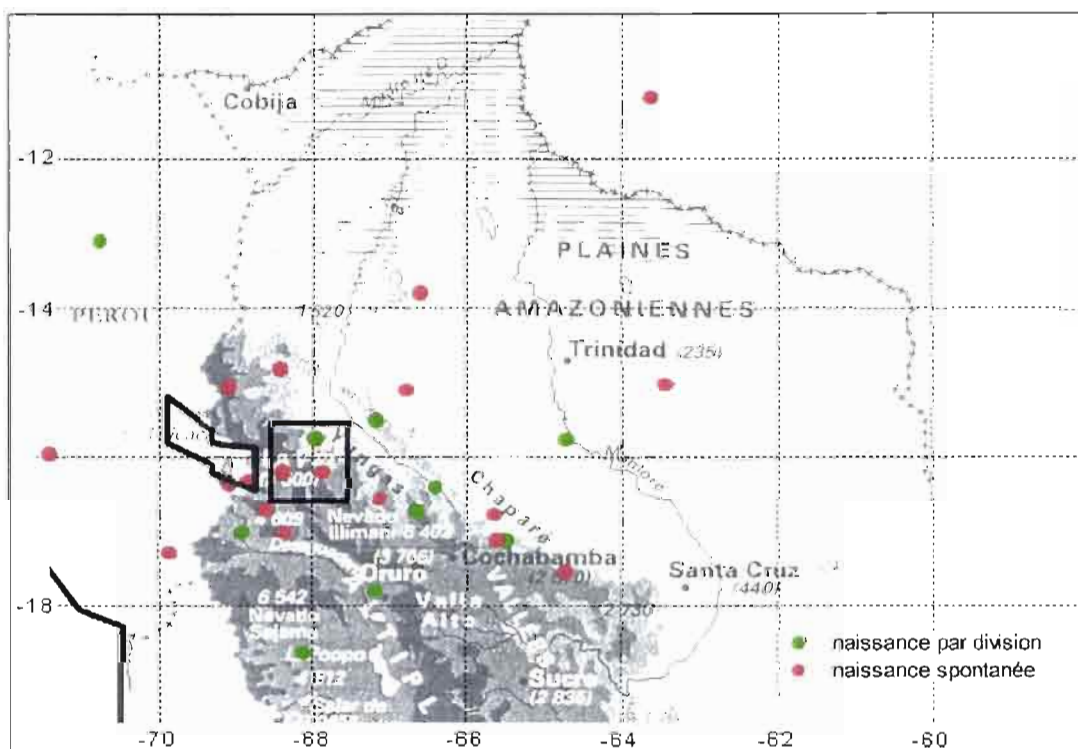
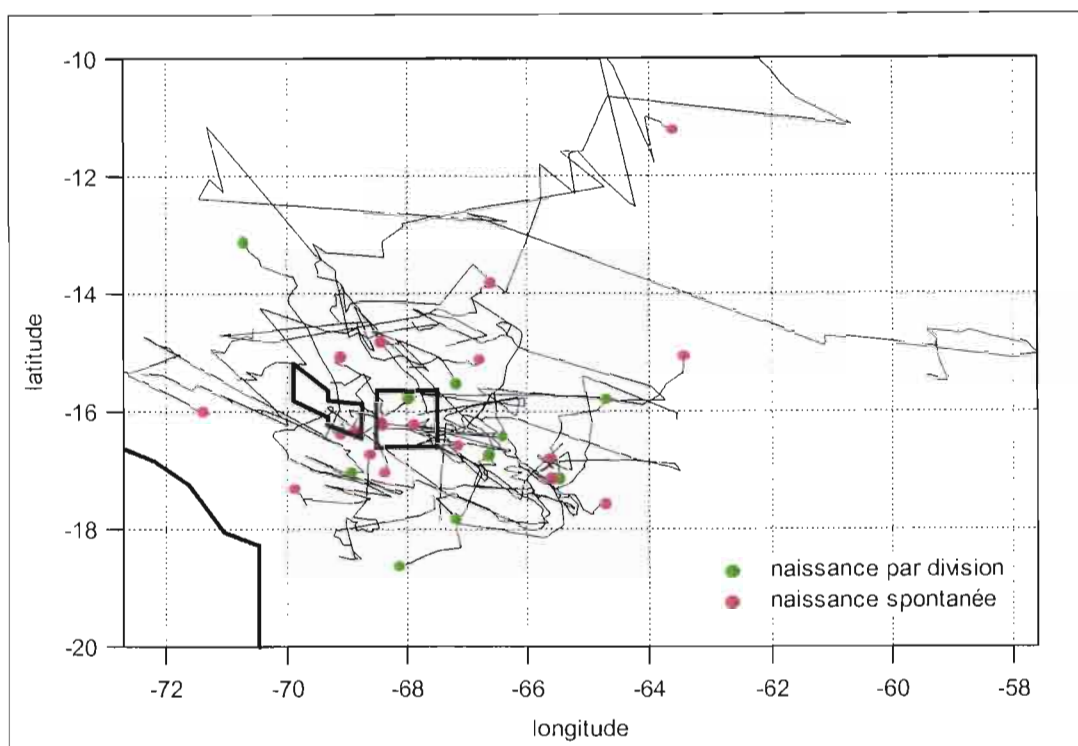
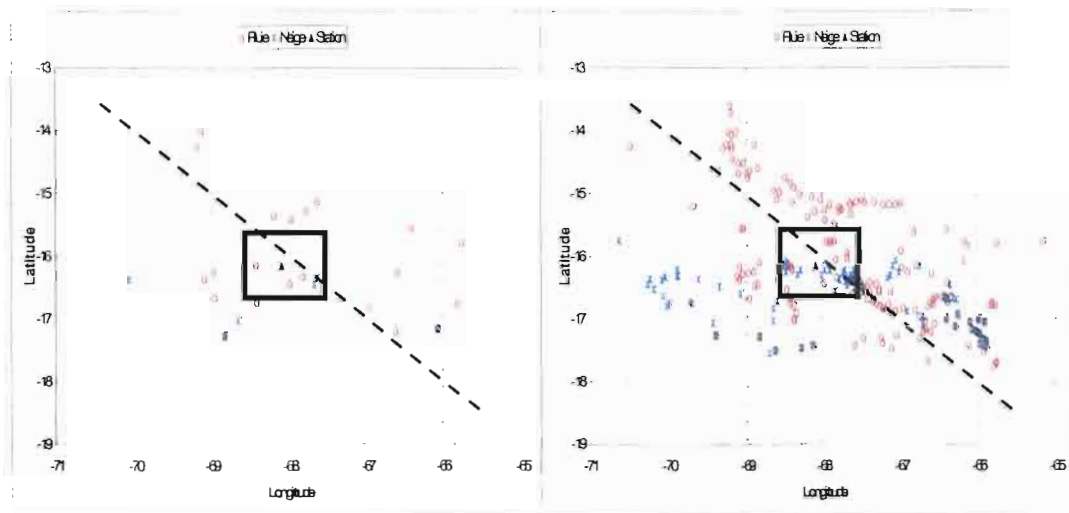


Figure 22 : Nombre moyen de pixels, pour chaque demi-heure de la journée, ayant touché le degré carré et donné des précipitations. Période du 11/01/99 au 28/02/99, Plataforma.



Figures 23 : Position des lieux de naissance et trajectoire des amas nuageux ayant touché le degré carré et donné des précipitations à la Plataforma. Période du 11/01/99 au 28/02/99.



Figures 24 : Position moyenne (gauche) et successive (droite) des amas nuageux ayant intercepté le degré carré et donné une précipitation caractérisée au sol. En pointillés on représente l'axe de la cordillère orientale. 11/01/99 – 28/02/99.

Sur les Figures 24 sont représentées les positions moyennes (Figure de gauche) des amas nuageux ayant touché le degré carré et donné une précipitation caractérisée au sol : pluie en rouge, neige en bleu. Les moyennes sont réalisées sur la durée de l'événement, c'est à dire entre leur naissance et leur disparition. La Figure de droite montre les positions successives de ces mêmes amas tout au long de l'événement : le nombre de points augmente et la dynamique de ces amas générateurs de pluie ou de neige peut être observée. Il semble que les nuages amenant des précipitations neigeuses soient plus locaux que ceux donnant de la pluie. L'étude de la taille des amas nuageux et de leur vitesse de déplacement permettrait certainement de préciser les choses.

4.2.2. Discussion

Les données utilisées correspondent à des résultats d'une mission organisée pour le suivi des systèmes convectifs au Brésil. Les températures seuils de tracking de 235 et de 210°K (soit respectivement -38.15°C et -63.15°C) ne sont pas forcément adaptées à notre zone de hautes montagnes et de plateaux élevés. Il n'existe pas à notre connaissance de travaux précis sur cette zone définissant un seuil de détection des nuages ; Garreaud & Wallace (1997), dans une étude sur la dynamique diurne des nuages convectifs sur les Amériques, utilisent une température de 235°K qui « correspond à une altitude de sommet de nuage au-dessus du niveau 300hPa et qui semble être assez froid pour ne pas être affecté par les changements de température du corps noir ou la nébulosité de faible altitude ». Même si on observe de la convection dans notre zone, les quantités d'eau relevées étant de faible intensité, on peut penser que le sommet des nuages est relativement « chaud » et que le seuil à -38°C soit trop froid pour décrire tous les nuages précipitants. Autre chose à prendre en considération : puisque les données initiales n'étaient pas extraites sur notre zone, l'intersection avec notre degré carré a été reconstituée en modélisant les nuages par une ellipse, ce qui peut également expliquer en partie la correspondance avec les pluies observées au sol.

Il faudrait donc tester à des seuils de détection plus chauds et avoir l'intersection exacte avec notre zone instrumentée au sol. Dans le cadre du projet engagé avec le PNRH, il est envisagé de récupérer les données de suivi des systèmes nuageux sur la zone pour toute la durée de l'expérimentation (novembre 2001 – mars 2002) à différents seuils, notamment plus chauds. On espère ainsi avoir une correspondance exacte entre les observations de terrain en continu et un suivi satellital adapté.

Cette méthode est intéressante à plus d'un titre. L'avantage le plus direct est la facilité d'utilisation due à l'économie du volume d'information traité : en effet, l'information est synthétisée dans une proportion de 1/30 par rapport au volume initial des images GOES. Elle permet également de classer les nuages précipitants en fonction de leurs caractéristiques : lieu de naissance (provenance locale ou lointaine), taille, développement vertical, durée de vie, vitesse de déplacement du système. On peut ensuite interpréter le cycle diurne des précipitations, voir si des zones préférentielles existent, caractériser le type de précipitations (neige ou pluie) et même éventuellement la quantité mesurée au sol en étudiant la provenance des masses d'air qui les ont produites et alimentées. L'influence de la cordillère sur le déplacement des perturbations serait ainsi certainement précisée. Ce suivi pourrait être étendu ensuite au sud de la Bolivie, où les événements pluvieux sont plus rares. Une comparaison interannuelle pourrait aussi nous montrer l'influence des épisodes Niño et Niña, sur le régime des pluies, en prenant dans un premier temps deux années hydrologiques bien contrastées (1996/97 et 1997/98 par exemple). Cette méthode semble offrir de nombreuses applications à l'amélioration de la connaissance du climat local et régional.

Ce qu'il faut retenir

L'étude statistique des données météorologiques nous a permis de mettre en évidence le comportement des variables climatiques température, humidité relative de l'air et rayonnement solaire selon que l'on observe de la pluie ou de la neige au sol.

L'humidité relative de l'air est en moyenne identique lorsqu'il pleut ou neige, mais les valeurs minimales sont plus faibles pour la pluie que pour la neige.

Les valeurs moyennes de rayonnement incident sont plus fortes pour la pluie que pour la neige.

La température est la variable la plus discriminante pour fixer l'occurrence de pluie ou de neige au sol. Une température critique de l'air au sol pour l'occurrence de neige peut être fixée. Elle est de +4.5°C. Au-delà de cette température, il n'y a pas de neige observée au sol. La température critique donnée par Auer en 1974 pour les Etats-Unis était de +6.1°C.

Les données satellitales croisées avec les informations de terrain nous conduisent à des premiers résultats intéressants d'ordre méthodologique.

Le suivi des amas nuageux permet de détecter une grande partie des précipitations au sol (58%) ce qui est acceptable compte tenu du fait que les données satellitales n'étaient pas spécialement extraites et traitées pour notre zone.

Les amas nuageux donnant des précipitations sur un degré carré autour de notre station météorologique ont des provenances variées. Même si les deux tiers naissent dans le bassin amazonien, un tiers naît dans les vallées sub-andines et sur l'altiplano. La circulation de ces masses d'air est très complexe et l'étude montre qu'il ne faut pas considérer la seule provenance amazonienne.

Par contre, il est difficile de localiser les amas responsables d'un type de précipitation. Ceci sera facilité très prochainement par l'utilisation de données satellitales mieux adaptées à notre zone.

Ceci offre des perspectives encourageantes pour une meilleure compréhension de la climatologie locale et régionale. L'utilisation conjointe des données de télédétection et des données terrain permettra une caractérisation des masses d'air responsables de la neige ou de la pluie au sol.

Conclusion

Ce travail de DEA a permis de préciser un thème encore peu abordé dans les Andes Tropicales, celui de la dynamique de la couverture neigeuse du point de vue de son apparition au sol.

Même s'il était a priori difficile de donner une température au seuil pluie neige, l'étude des données climatologiques associées aux observations de terrain a montré les relations existantes entre les variables climatiques comme l'humidité relative de l'air, le rayonnement, la température de l'air et l'occurrence au sol de pluie ou de neige.

Une température critique de l'air pour l'occurrence de neige au sol a été définie : au-delà de +4.5°C, il n'y a plus de neige observée au sol. Il était important de connaître cette température puisqu'une modélisation de la production d'écoulement en cours dans la vallée du Zongo utilise une température seuil pour distinguer les précipitations solides ou liquides.

L'autre axe de recherche concernait la localisation et l'identification grâce aux outils de la télédétection des amas nuageux responsables des précipitations observées sur notre site d'étude. Avec notre méthode de suivi des amas nuageux, on explique 58% des précipitations observées au sol, ce qui est prometteur compte tenu du fait que les données satellitales n'étaient pas spécialement extraites et traitées pour notre zone. Il en ressort également qu'une partie des nuages donnant des précipitations sur notre zone provient de l'Altiplano ou des vallées sub-andines et que la seule provenance amazonienne n'est pas vérifiée. Ceci offre des perspectives intéressantes de caractérisation de masses d'air différentes qui pourraient être à l'origine d'un type de précipitation : pluie ou neige.

Cette étude constitue donc une phase préliminaire au Programme National de Recherche en Hydrologie « Dynamique de la couverture neigeuse dans les Andes Tropicales » qui sera mis en place à la prochaine saison pluvieuse sur cette même zone. Il sera facilité par l'utilisation de données satellitales mieux adaptées à notre zone.

Bibliographie

- ACEITUNO P., 1996 – Elementos del Clima en el Altiplano Sudamericano – *Revista Geofisica* n°44, enero-junio 1996, 37-55.
- ARNAUD Y., DESBOIS M., MAIZI J., 1992 – Automatic tracking and characterization of African convective systems on Meteosat pictures. *J. Appl. Meteor.*, 31, 443-453.
- ARNAUD Y., RIBSTEIN P., 2001 – Télédétection et hydrologie des glaciers : exemples dans les Andes Tropicales. *Actes du séminaire Télédétection et ressource en eau*, mars 2001, Toulouse.
- AUER A.H., 1974 - The Rain Versus Snow Threshold Temperatures. *Weatherwise*. 67-77.
- BARRY R.G., 1982 – Atmosphere weather and climate. 4th edition, (ed Robert McConnin) Library of Congress Catalogue-in-Publication Data.
- BARRY R.G., 1992 - *Mountain weather and climate*. 2nd edition, (ed Robert McConnin) Library of Congress Catalogue-in-Publication Data.
- BINGMAN S.L., 1993 - *Physical Hydrology* (ed Robert McConnin) Library of Congress Catalogue-in-Publication Data.
- BLOSCHL G., KIRNBAUER R., AND GUTKNECHT D., 1990 - Modelling snowmelt in a mountainous river basin on an event basis. *Journal of Hydrology*, 113(1-4): 207-229.
- BRUN E & MARTIN E., 1997 - Couplage d'un modèle de neige avec un modèle de climat. *La Houille Blanche*, 7, 69-75
- BRUN E., DAVID P., SUDUL M. AND BRUNOT G., 1992 - A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 38, n°128, p13-22.
- BRUN E., MARTIN E., SIMON V., GENDRE C. AND COLÉOU C., 1989 - An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 35, n° 121, p 333-342.
- CABALLERO Y., 1998 - Modélisation intégrée d'un système bassin versant aménagé de la Cordillère des Andes (Vallée du Zongo - Bolivie). *Mémoire DEA, Université Montpellier II*, -56 +ann.p.
- CHAFFAUT I., 1998 - *Précipitations d'altitudes, eaux souterraines et changements climatiques de l'Altiplano nord-chilien*. Thèse Doctorat, Université Paris-Sud,
- CLINE D. W., BALES R. C., AND DOZIER J., 1998. Estimating the spatial distribution of snow in mountain basis using remote sensing and energy balance modeling. *Water Resources Research*, 34(5): 1275-1285.
- DOUVILLE H., ROYER J-F. and MAHFOUF J-F., 1995 - A new snow parametrization for the Meteo-France climate model. Part I: validation in stand-alone simulations. Part II : validation in a 3-D GCM experiment. *Climate Dynamics*, 12 (1) : 21-52.

DUROT K., 1999 - Modélisation hydrologique distribuée du bassin versant nivo-pluvial de Sarenes. Validation des données d'entrée et développement d'un module de fonte nivale sous forêt. Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement. *Thèse de Doctorat*.

ETCHEVERS P., 1999 - Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du Rhône. *Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier (Toulouse III)*. 361p.

Fédération Française de la Montagne et de l'Escalade, <http://www.ffme.fr/>
<http://www.ffme.fr/technique/meteorologie/introduction/intro.htm>

FRANCOU B., RIBSTEIN P., 1995 - Glaciers et évolution climatique dans les Andes boliviennes. Glacier de Zongo et glacier de Chacaltaya, Cordillère Royale, 16°S. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 24 (1) : 23-36.

FRANCOU B., RIBSTEIN P., POUYAUD B., 1997 - La fonte des glaciers tropicaux. Ils comptent parmi les indicateurs les plus fiables d'un réchauffement global. *La Recherche*, (302) : 34-37.

FRANQUEVILLE A., 2000 - La Bolivie d'un pillage à l'autre, *Presses Universitaires du Mirail - IRD Editions*, 292p.

GARREAU D., WALLACE J.M., 1997 - The diurnal march of convective cloudiness over the Americas. *Monthly Weather Review*, 125, 3157-3171.

HALL D. K., 1996 - Remote sensing applications to hydrology: Imaging radar. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4): 609-636.

HUMBOLDT A., 1843 - Asie centrale, recherches sur les chaînes de montagnes et la climatologie comparée. *Gide*, Paris.

JOMELLI V., CABALLERO Y., CHEVALLIER P., and RIBSTEIN P., 2001 - Hydrological characteristics of slope deposits in high tropical mountains (Cordillera Real, Bolivia). *Catena*.

LARSON L.W & PECK E.L., 1974 - Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling. *Water Resources Research*, 10 (4) , 857-863.

LEBLANC J.M., SICART J.E., GALLAIRE R., RIBSTEIN P., POUYAUD B., FRANCOU B., VALDIVIESO H., 2000 - Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, année hydrologique 97/98. *IRD-Bolivie, Rapport n°1*, Janvier 2000. 100 p.

LESAFFRE B., POUGATH E. & MARTIN E., 1997 - Détermination objective des caractéristiques des grains de neige à partir d'images. *La Houille Blanche*. 7, 76-82.

LIBOUTRY L., 1964 - Traité de glaciologie, *Masson et Cie*, Paris. 364p.

LLAMAS J., 1993 - Hydrologie générale : Principes et applications, *Gaëtan morin*.

LLIBOUTRY L., 1999 - "Glaciers of the dry Andes". *USGS professional paper* , 1-9.

MATHON V., 2001 - Etude climatique des systèmes convectifs de méso-échelle en Afrique de l'Ouest. *Thèse de doctorat, Université Paris 7 – Denis Diderot*, 184 p.

MATHON V., LAURENT H., 2001 – Life cycle of the Sahelian mesoscale convective cloud systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127, 337-406.

MEIER M. F., 1980 - Remote sensing of snow and ice. *Hydrological Sciences Journal*, 25 (3) : 307-330.

MOGNARD N.M., 2001 – Télédétection du manteau neigeux. *Actes du séminaire Télédétection et ressource en eau, mars 2001, Toulouse*.

MONTES DE OCA I., 1989 - Geografía y recursos naturales de Bolivia, 574p., La Paz.

MULLER F., 1998 - Suivi de l'enneigement et de l'altitude de la ligne de neige du Sajama à l'aide d'images Landsat TM et MSS et d'une photo aérienne de 1963 à 1996. UFR de Géographie Université de Strasbourg, ORSTOM, ABTEMA. *Mémoire de DEA*.

NOILHAN J., PLANTON S., 1989 – A simple parametrization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, n°3.

NOILHAN J., MAHFOUF J.F., 1996 – The ISBA land-surface parametrization scheme. *Global and Planetary Change*, 13, 145-159.

POUYAUD B., RIBSTEIN P., GALLAIRE R., CHEVALLIER P., CABALLERO Y., BERTHIER E., 1999 - Régimes hydrologiques des hauts bassins nivo-glaciaires boliviens et variabilité pluviométrique des vallées andines en conditions El Niño et La Niña. *Manaus'99, Hydrological and geochemical Processes in Large Scale River Basins*, nov. 15-19, 1999.p.

QUENEY P., 1974 - *Eléments de Météorologie, Masson, Paris*.

RANGO A., 1980 - Operational applications of satellite snow cover observations. *Water Resources Bulletin*, 16 (6) : 1066-1073.

RANGO A., 1993 - II. Snow hydrology processes and remote sensing. *Hydrological Processes*, 7 (2) : 121-138.

RANGO A., 1994 - Application of remote sensing methods to hydrology and water resources. *Hydrological Sciences Journal*, 39 (4) : 309-320.

RANGO A., 1996 - Spaceborne remote sensing for snow hydrology applications. *Hydrological Sciences Journal*, 41 (4) : 477-494.

RANGO, A., 1985 - An international perspective on large-scale snow studies. *Hydrological Sciences Journal*, 30 (2) : 225-238.

REINHARDT I., 1997 - Analyse des composantes naturelles et artificielles de la ressource en eau de la vallée du Zongo en Bolivie. Etude préliminaire et préparation d'une modélisation hydrologique. *Mémoire diplôme postgrade, EPFL*, 85p.

RIBSTEIN P., TIRIAU E., FRANCOU B., SARAVIA R., 1995 - Tropical climate and glacier hydrology : a case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*, 165 : 221-234.

ROCHE M.A., 1992 - El Clima de Bolivia, Programa Hidrológico Y Climatológico de la Cuenca Amazonica de Bolivia (PHICAB), Actas del Seminario sobre el PHICAP, 5 y 6 noviembre de 1992, Bolivia.

ROHRER M., 1989 - Determination of the transition air temperature from snow to rain and intensity of precipitation. (WMO/IAHS/ETH Workshop on Precipitation Measurement) : Swiss Federal Institute of Technology. 475-482. (ed B.Sevruk).

ROSENTHAL W. AND DOZIER J., 1996 - Automated mapping of montane snow cover at subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper. *Water Resources Research*, 32 (1) : 115-130.

SHWER T.A., 1989 - Different types of precipitation in climatic zones. WMO/IAHS/ETH Workshop on Precipitation Measurement : Swiss Federal Institute of Technology. 483-487. (ed B.Sevruk).

SICART J.E, RIBSTEIN P., CHAZARIN J.P., BERTHIER E., 2001 - Solid precipitation on a tropical glacier in Bolivia using ultrasonic depth gauge measurements", soumis au *Water resource research*.

SINGH P. AND KUMAR N., 1997 - Impact assessment of climate change on the hydrological response of a snow and glacier melt runoff dominated Himalayan river. *Journal of Hydrology*, 193 (1-4) : 316-350.

VUILLE M., BRADLEY R.S., AND KEIMIG F., 2000 - Interannual climate variability in the Central Andes and their relation to tropical Pacific and Atlantic forcing, *J. Geophys. Res.*, 105, 12447-12460.

WAGNON P., 1999 - Analyse du bilan d'énergie d'un glacier tropical , application à la relation glacier – climat. *Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier*, 199 p.

WILLIAMS M., HOUZE R.A., 1987 – Satellite-observed characteristics of winter monsoon cloud cluster. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 505-519.

Résumé

Dans les Andes Tropicales boliviennes, le programme Great Ice de l'IRD étudie depuis 1991 au travers d'un glacier expérimental, le glacier Zongo (4900-6088 m, Cordillère Royale), les changements climatiques et la ressource en eau. Le dispositif de mesures mis en place sur ce glacier a été élargi à partir de 1998 pour s'intéresser à l'ensemble du cycle hydrologique dans la vallée à l'aval. Dans le cadre d'un projet validé par le Programme National de Recherche en Hydrologie, une expérimentation devrait préciser dans les prochains mois (saison humide 2001-2002) la dynamique de la couverture neigeuse hors des zones englacées, thème encore peu abordé dans cette zone.

Dans ce mémoire, il est proposé un état des connaissances sur les conditions climatiques susceptibles de caractériser la nature solide ou liquide des précipitations. A partir de mesures météorologiques et d'observations qualitatives de terrain, on essaie d'établir les caractéristiques climatiques au sol permettant de discriminer le type de précipitations : pluie ou neige. En s'attachant plus particulièrement à la température, on délimite ainsi des domaines d'existence pour les précipitations. Dans un deuxième temps, on utilise l'information satellitale pour suivre les amas nuageux en croisant la signature spectrale du sommet des nuages à 235°K, avec l'information disponible au sol. A travers cette analyse, il s'agit d'identifier les événements responsables d'un type de précipitation selon le lieu de formation des amas nuageux.

Mots clefs

Andes Tropicales, Bolivie, type de précipitations, pluie, neige, température critique, dynamique de la couverture neigeuse, suivi des amas nuageux