



UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

Master : *Sciences et Technologies*

Mention : *Biologie, Géosciences, Agroressources, Environnement*

Spécialité : *Ecologie Fonctionnelle et Développement Durable*

Parcours : *Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels Et Cultivés*

**Risques de gel et scénarios climatiques dans l'altiplano sud de Bolivie :  
spatialisation de la vulnérabilité écologique des cultures de quinoa**

**par Robin POUTEAU**

Stage de M2

réalisé sous la direction de Serge RAMBAL (CNRS)\* et Thierry WINKEL (IRD)\*\*

\* Département Fonctionnement des  
Ecosystèmes (FE) ;  
UMR 5175 Centre d'Ecologie  
Fonctionnelle et Evolutive (CEFE)

\*\* UR 060 Climat et Fonctionnement des  
Agro Ecosystèmes (CLIFA)

CNRS, 1919 Route de Mende – F34293 Montpellier Cedex 5

**Soutenu le 11 Juin 2008 à Montpellier**

Rapporteur : Jean-Luc CHOTTE (IRD-UR SeqBio)

Jury : Mireille CHARMANTIER (UM2-UMR EcoLag)  
Aurélie METAY (SupAgro-UMR System)  
Nathalie FROMIN (CNRS-UMR CEFE)  
Benoît JAILLARD (INRA-UMR BSR)





## Résumé

Le succès commercial international de la quinoa amène les agriculteurs de la région des salars, au sud des hauts plateaux boliviens, à cultiver des zones de plaine soumises à d'importants risques de gelée radiative nocturne. Bien que la quinoa soit adaptée aux conditions extrêmes de l'altiplano, sa sensibilité au froid dépend de sa phénologie et le risque de gel n'est jamais nul. Les trois phases phénologiques de la quinoa (croissance végétative, floraison et maturation) sont en correspondance avec les dynamiques atmosphériques saisonnières déterminant les risques de gel. S'ils varient avec le temps, ces risques dépendent aussi fortement du topoclimat. Le système de télédétection satellitaire MODIS enregistre les températures radiatives de surface et la présence de nuages quotidiennement et en tout point de cette région avec une résolution kilométrique. Conjugué à un système d'information géographique et aux relevés de 3 stations météorologiques *in situ*, MODIS a été validé pour spatialiser les risques de gel, abordés par un calcul probabiliste. Pour chacune des trois phases phénologiques de la quinoa, un modèle simple d'estimation des risques a été construit à partir de leur relation avec plusieurs indices orotopographiques pour comprendre les processus mis en jeu lors des gelées et cartographier les risques à une résolution spatiale de 100 m, plus proche de celle de ces processus eux-mêmes et des interventions des agriculteurs. Dans cette région de montagne (3650-5900 m), le climat local est largement déterminé par l'altitude mais aussi par la latitude, la proximité des salars, la pente et son exposition. Un indice quantifiant le phénomène de drainage adiabatique a également été ajouté. Les modèles ont été calibrés par régression multiple avec un échantillon de pixels homogènes en termes d'indices orotopographiques puis validés statistiquement. Cette approche quantitative a mis en évidence l'action relative de chaque facteur orotopographique sur le climat et leurs interactions mutuelles. Enfin, le modèle de circulation globale CNRM-CM3, simulant le scénario climatique IPCC-SRES A1B, a été utilisé pour montrer que l'altiplano sera particulièrement affecté par le réchauffement global avec une augmentation moyenne de 3 °C entre 1980 et 2100 pendant toute la saison de culture. Ce réchauffement se manifestera par une diminution considérable voire totale des risques de gel à l'horizon 2100.

**Mots-clés** : changement d'échelle ; paysage ; télédétection ; température radiative de surface ; topoclimat



**Avant-propos**

Le programme ANR EQUICO (Emergence de la Quinoa dans le Commerce Mondial, ANR-06-PADD-0011), dans lequel s'inscrit ce travail, s'intéresse à la durabilité de la culture de la quinoa entrée, apparemment avec succès, dans la mondialisation des échanges, mais qui présente des menaces écologiques sérieuses : risques bioclimatiques, mais aussi érosion et épuisement des sols, concurrence pour l'usage des terres, pertes de biodiversité. Ce programme s'attache à analyser les relations entre l'essor récent de la culture de la quinoa et les dynamiques de développement local impulsées par le marché international, dans un contexte écologique et social fragile.



## Table des matières

|   |    |
|---|----|
| Liste des abréviations .....  | 9  |
| Introduction .....  | 11 |
| Matériels et méthodes.....  | 15 |
| Zone d'étude .....  | 15 |
| La quinoa et le gel.....  | 15 |
| Données météorologiques .....   | 17 |
| Données satellitaires de température radiative de surface (Ts).....   | 17 |
| Caractérisation du terrain.....   | 17 |
| Validation des données MODIS avec les relevés météorologiques in situ .....   | 19 |
| Construction des cartes de risques.....   | 19 |
| Changement d'échelle à partir de l'orotopographie .....   | 21 |
| Extension des cultures et risques de gel.....   | 23 |
| Scénarios climatiques .....   | 25 |
| Résultats .....   | 25 |
| Analyse fréquentielle des températures minimales.....   | 25 |
| Validation des données MODIS .....  | 27 |
| Construction des cartes de risques.....   | 27 |
| Influence de l'orotopographie sur les risques de gel.....   | 29 |
| Changement d'échelle à partir de l'orotopographie .....   | 31 |
| Extension des cultures et risques de gel.....   | 31 |
| Conséquences attendues des changements climatiques .....  | 31 |
| Discussion.....   | 33 |
| Variations temporelles des risques de gel .....   | 33 |
| Variations spatiales des risques de gel.....  | 35 |
| Conséquences attendues des changements climatiques .....  | 37 |
| Conclusion .....  | 39 |
| Références bibliographiques.....  | 45 |
| Annexe 1 : Fondements théoriques de la température radiative de surface.....  | 53 |
| Annexe 2 : Distribution de probabilité des Ts durant les trois phases phénologiques de la quinoa à Salinas.....   | 57 |
| Annexe 3 : Distribution spatiale des risques de gel calculés à partir de la série d'images MODIS pour les trois phases phénologiques de la quinoa ..... | 59 |
| Annexe 4 : Correlations entre les risques de gel estimés et ceux observés durant les trois phases phénologiques de la quinoa.....                       | 61 |
| Annexe 5 : Régression linéaire entre les risques de gel estimés en janvier-février et les Ts mesurées lors d'une nuit froide : le 5 février 2008 .....  | 63 |
| Annexe 6 : Représentation schématique des échelles de temps et d'espace qui agissent sur les risques de gel.....  | 65 |



## Liste des abréviations

CTI : Compound Topographic Index

CNRM-CM3 : Coupled global climate Model 3 du Centre National de Recherches  
Météorologiques

IPCC-SRES : Special Report on Emissions Scenarios of the Intergovernmental Panel  
on Climate Change

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

Prob : Probabilité

sd : Sans date

SIG : Système d'information géographique

Tmax : Température maximale de l'air

Tmin : Température minimale de l'air

Ts : Température radiative de la surface



## Introduction

La quinoa est une pseudocéréale originaire des Andes. Depuis le début des années 1980, son marché connaît un essor sans précédent, lié à l'engouement des consommateurs nord-américains, européens et japonais pour cet aliment exceptionnellement riche en protéines, acides gras essentiels, vitamines et minéraux (Ruales & Nair, 1993). Pour satisfaire cette demande, les agriculteurs des hauts plateaux boliviens ont intensifié leur système de culture. Ainsi, cette culture traditionnelle de subsistance s'est convertie en une culture de rente, mécanisée. Les parcelles de quinoa, traditionnellement localisée sur les pentes des reliefs, se sont alors étendues vers les plaines pour permettre aux engins agricoles de circuler et accroître les surfaces cultivées, au détriment des parcours d'élevage. Le développement de la culture de la quinoa se manifeste donc par une extension de la frontière agricole vers des secteurs, *a priori*, plus exposés au gel, puisque le froid nocturne est drainé vers les zones basses du relief. Dans le contexte écologique et social vulnérable des hauts plateaux boliviens, il est donc primordial d'évaluer les risques de gel pour ces cultures de quinoa, en précisant autant que possible leur répartition spatiale et leur évolution potentielle afin de prévenir les acteurs locaux des risques agroclimatiques associés aux changements en cours.

Or en montagne, les événements climatiques ont une forte composante spatiale. Les problématiques liées au zonage des risques de gel et à la distribution des températures minimales à l'échelle d'un paysage d'altitude font l'objet de travaux nombreux. Benavides *et al.* (2007) ont cartographié les températures moyennes de janvier dans les montagnes cantabriques du Nord de l'Espagne par krigeage. Les géostatistiques ont également été utilisées par Daly *et al.* (2003) pour modéliser le climat portoricain au moyen du modèle PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model), calibré avec les relevés de 47 stations météorologiques caractérisées par leur altitude, leur exposition et leur continentalité. Lookingbill & Urban (2003) ont étudié les températures minimales (Tmin) du bassin versant des Cascades Ouest de l'Oregon grâce à 45 micro-enregistreurs de température et de rayonnement net placés à différentes altitudes et distances des cours d'eau. Ils ont utilisé une régression multiple pour corrélérer et interpoler les Tmin avec ces deux caractéristiques du terrain ainsi que le rayonnement net potentiel. Ninyerola *et al.* (2007) ont utilisé la même méthode pour les températures minimales de l'air (Tmin) mensuelles à l'échelle de toute la péninsule ibérique en utilisant 1440 stations météorologiques et les indices d'altitude, de latitude et de continentalité. Toujours en utilisant une régression multiple à échelle locale suivie d'une interpolation, Lindkvist *et al.* (2000) et Blennow & Lindkvist (2000) ont étudié les risques de gel pour la gestion des exploitations forestières suédoises (respectivement pour les stades phénologiques adulte et plantule) dans la région montagneuse des Scandes à partir des relevés de 38 stations météorologiques. Lindkvist *et al.* (2000) ont utilisé comme descripteurs topographiques l'altitude et la forme du terrain (plane ou en pente, concave ou convexe) tandis que Blennow & Lindkvist (2000) ont employé l'altitude, la latitude, le rayonnement net potentiel et un indice dit « catchment area », paramétrant le drainage nocturne de l'air froid. Le type de descripteurs environnementaux retenus, et le nombre élevé de stations météorologiques mises en oeuvre dans ces travaux prouvent que la topographie et sa distribution dans l'espace (orotopographie) sont les principaux facteurs explicatifs de la variation spatiale des Tmin à l'échelle du paysage.



François *et al.* (1999) ont déjà établi une carte des zones à risque de gel à l'échelle de l'altiplano bolivien dans son ensemble ainsi qu'une carte des zones à risque de gel pour la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) dans la partie nord de l'altiplano. Ces cartes ont été créées à partir de séries plus ou moins longues de relevés de 17 stations météorologiques. Le réseau météorologique de cette région est limité et a donc dû être complété par quelques images satellitaires NOAA-AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer, USA). Mais la résolution spatiale et temporelle de ces travaux ne permet pas d'établir un diagnostic de qualité pour notre problématique centrée sur la culture de la quinoa dans le sud de l'altiplano.

Les progrès de l'informatique et des systèmes d'informations géographiques (SIG) ont permis d'améliorer significativement les modèles thermiques, hydrologiques, écologiques et les outils d'aide à la décision. La faible résolution des entrées spatioclimatiques (~50 km) a longtemps conduit à de sérieuses erreurs d'interprétation des résultats, de conclusions et de décisions prises à partir de ces résultats. En effet, de telles entrées ne permettent pas de prendre en compte des caractéristiques spatioclimatiques connues, comme les gradients thermiques d'élévation par exemple, particulièrement importants dans les régions de relief accidenté. Résolution d'une image et réalisme sont donc liés (Daly, 2006). Aujourd'hui, la télédétection est bien plus précise (1 km) ce qui permet de limiter les biais, d'obtenir des résultats plus réalistes et à une échelle plus fine (Willmott & Johnson, 2005). Ces nouvelles technologies offrent donc des outils performants pour décrire et comprendre les phénomènes climatiques (MacMillan *et al.*, 2004) tels que les répartitions de températures à différentes échelles temporelles et spatiales (Li *et al.*, 2006).

Les préoccupations émergentes de l'impact du réchauffement climatique sur les écosystèmes naturels et cultivés amènent les chercheurs à créer de nombreux outils de simulations. Boulanger *et al.* (2006) ont comparé sept modèles de simulation du climat sud américain qui s'accordent tous à montrer qu'au cours du 21<sup>ème</sup> siècle l'altiplano sera particulièrement impacté. Les études menées sur place s'intéressent particulièrement au recul des glaciers, considérés comme indicateurs naturels des changements du climat régional. Elles démontrent que le réchauffement global s'est déjà manifesté, depuis l'aire industrielle, par une augmentation allant de 0,10 °C (Vuille *et al.*, sd) à 0,39 °C (Mark & Seltzer, 2005) selon l'altitude. Bradley *et al.* (2006) prévoient une augmentation de la température de surface de 3 à 4 °C dans les Andes tropicales d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, selon le scénario IPCC-SRES (Intergovernmental Panel on Climate Change-Special Report on Emissions Scenarios) A2. Ce réchauffement engagé depuis plusieurs décennies pourrait donc avoir permis la mutation agricole que connaît actuellement la région des Salars, au sud de l'altiplano bolivien. Mais pour vérifier cette hypothèse il faut pouvoir préciser les interactions entre climat et paysage à l'échelle locale qui est celle de la mise en valeur agricole.

Le présent travail vise à caractériser le climat dans lequel se développe l'activité de culture de la quinoa, à comprendre les variations spatiales et temporelles (intra- comme inter-annuelles) des risques de gel et à identifier et quantifier les facteurs de variation. Cette étude originale soulève en outre des questions récurrentes dans le monde de la recherche scientifique : quels sont les facteurs orotopographiques qui expliquent la répartition spatiale des températures minimales à une échelle fine ? Les relations entre climat et orotopographie sont-elles dépendantes de l'échelle considérée ? Comment passer de cartes de températures minimales à des cartes de risque climatique pour des cultures ? Comment les risques vont-ils évoluer avec les changements climatiques qui affectent particulièrement cette région du globe ?



## Matériels et méthodes

### *Zone d'étude*

L'étude concerne la région des salars en Bolivie, première région productrice de quinoa couvrant partiellement les départements de Oruro et Potosi, entre 19°15' et 22°00' sud et entre 66°26' et 68°15' ouest (figure 1). Du fait de son altitude élevée (3650 à 5900 m), la zone d'étude est caractérisée par un climat tropical aride et froid : les précipitations se situent entre 100 et 350 mm an<sup>-1</sup>, et la moyenne annuelle des températures (voisine de 9 °C) masque des amplitudes thermiques journalières supérieures aux variations saisonnières et pouvant atteindre jusqu'à 25 °C (Lebonvallet, 2008).

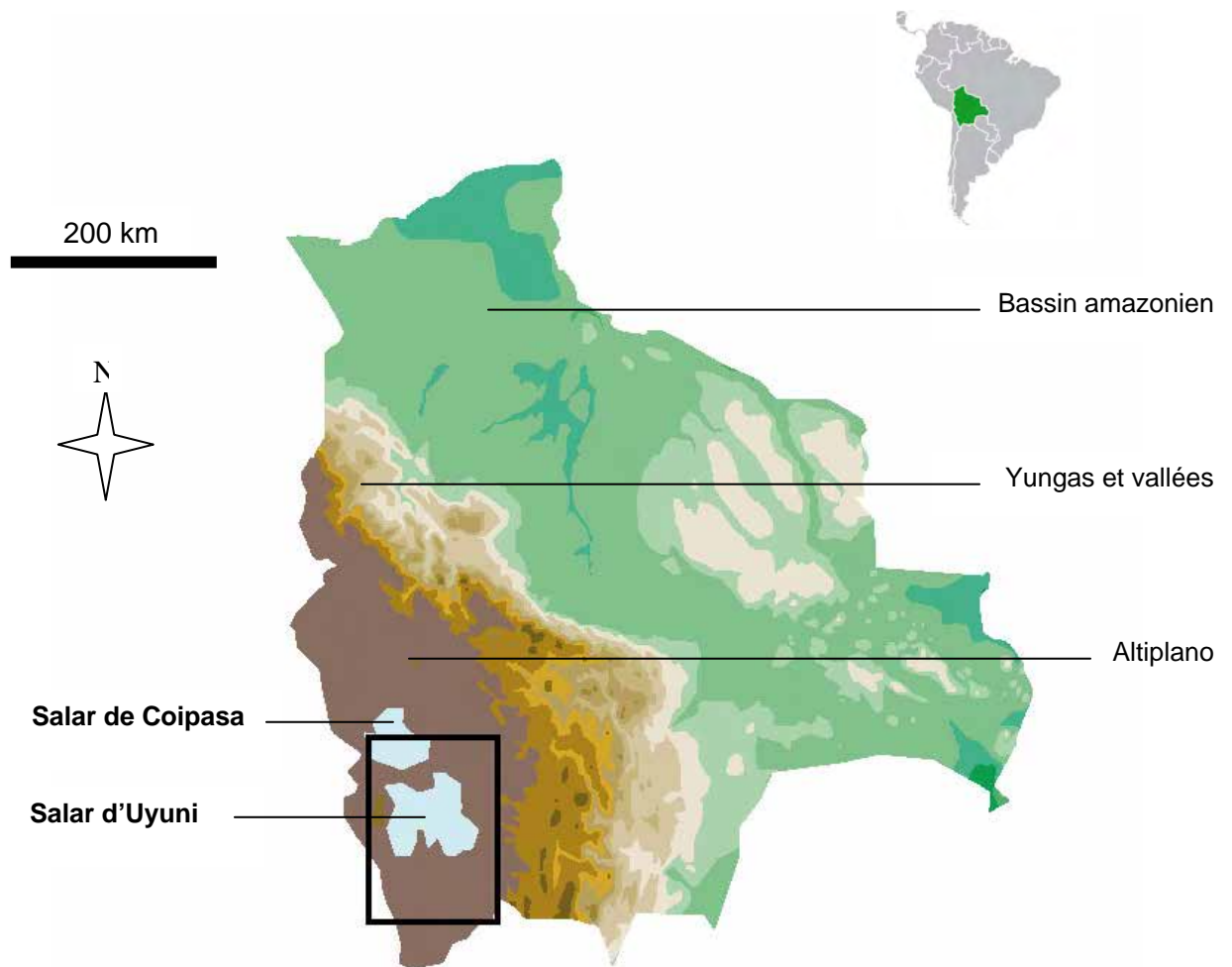
### *La quinoa et le gel*

La quinoa est remarquablement adaptée aux conditions climatiques extrêmes de l'altiplano. En effet, cette annuelle a un cycle de vie réduit de 90 à 180 jours, selon les variétés et les conditions de culture (Izquierdo *et al.*, 2001). De plus, ses graines sont capables de germer à des températures voisines de 0 °C (Bois *et al.*, 2006), la plante au stade reproducteur peut résister à des températures de -7 °C (Le Tacon, 1992) et certains auteurs ont observé *in situ* qu'elle pouvait survivre à des gelées allant jusqu'à -16 °C au stade végétatif (Catacora & Canahua, 1992). Ces observations illustrent la dimension temporelle des risques de gel, la sensibilité au froid étant liée au stade phénologique des plantes de quinoa (Bois *et al.*, 2006 ; Jacobsen *et al.*, 2005 ; Sakai & Larcher, 1987) (tableau 1) et la probabilité de gel n'étant jamais nulle même en été (Le Tacon *et al.*, 1992).

Sur les hauts plateaux andins, il existe deux types de gelées : les gelées radiatives et les gelées advectives. Ces dernières ne représentent que 20% du total des gelées observées (Frère *et al.*, 1978). Aussi appelées « gelées noires », elles sont dues à la remontée de masses d'air polaires. Ces advections froides sont quatre fois moins fréquentes l'été que l'hiver, quand la zone de convergence intertropicale se déplace au nord (Ronchail, 1989). Ce type d'événement climatique ne représente donc pas une menace pour la culture de la quinoa qui ne se pratique pas à cette période. Au contraire, les gelées radiatives nocturnes ou « gelées blanches » sont fréquentes et peuvent provoquer des dégâts considérables (il n'est pas rare de voir 80% de la récolte détruite, selon le témoignage des producteurs). Ce phénomène n'a lieu que par temps clair et calme (Oke, 1987). Il a pour origine l'échange d'énergie par rayonnement entre le sol, l'atmosphère et l'espace (annexe 1).

Dans la zone d'étude, le risque de gel est conditionné par deux facteurs agissant à des échelles différentes :

- la dynamique climatique régionale voire continentale, aux variations journalières et saisonnières, qui donne deux types de temps : temps clair et calme, favorable aux gelées radiatives, ou nuageux et plus ou moins venteux ;
- le topoclimat qui met en jeu des processus à échelle locale. Cette composante orotopographique, dont la compréhension est l'objet de ces travaux, est largement responsable des variations spatiales de température (Kalthoff *et al.*, 2006) et conditionne l'aptitude d'un secteur à la culture de la quinoa.



**Figure 1 : La zone d'étude (cadre noir)** se situe sur l'altiplano bolivien. Ce quadrilatère d'environ 250 x 350 km, centré sur le Salar d'Uyuni, est la principale zone de production de quinoa en Bolivie.

| Phase phénologique    | Durée             | Seuil de sensibilité au gel (Tmin) |
|-----------------------|-------------------|------------------------------------|
| Croissance végétative | novembre-décembre | -7 °C                              |
| Floraison             | janvier-février   | -3 °C                              |
| Maturation            | mars-avril        | -7 °C                              |

**Tableau 1 : Les phases phénologiques majeures de la quinoa, leurs périodes et seuils de sensibilité au gel correspondants (d'après Jacobsen *et al.*, 2005)**

### *Données météorologiques*

Seulement trois stations météorologiques couvrent cette zone (tableau 2). Celle de Salinas appartient au SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Bolivie) tandis que les stations Bowen de Jirira et Irpani ont été installées temporairement par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement, France).

### *Données satellitaires de température radiative de surface (Ts)*

La télédétection par satellite offre l'avantage d'une information spatialisée et répétitive dans le temps. Le programme Earth System Science de la NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) utilise plusieurs types de satellites et de radiomètres embarqués avec chacun une mission spécifique. Le système MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) propose différents produits dérivés de ses observations visant à décrire les océans, les terres et l'atmosphère (<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/index.php>). En particulier les produits « MOD11 » modélisent les températures radiatives de surface (Ts). Le système MODIS est embarqué sur deux satellites héliosynchrones : Terra et Aqua. Ils couvrent quotidiennement l'ensemble de la surface de la Terre dans 36 bandes spectrales (visible et infrarouge). L'orbite de Terra croise l'équateur à 10h30 et 22h30 ; celle de Aqua à 01h30 et 13h30 (<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>). Le produit « MOD11 » est le résultat de la modélisation de la Ts à partir des bandes spectrales infrarouge 31 et 32 (respectivement : 10,780 – 11,280  $\mu\text{m}$  et 11,770 – 12,270  $\mu\text{m}$ ). Le modèle prenant notamment comme entrée l'émissivité de la surface suit un algorithme décrit par Wan & Li (1997) ([http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod11.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf)). Le système propose donc des Ts diurnes et nocturnes et c'est le produit MODIS embarqué sur Aqua (MYD11A1) qui offre des Ts nocturnes (2h00) *a priori* les plus proches des T<sub>min</sub> mesurées au sol. Les données ont une résolution spatiale de 1 km.

La dernière version (V5) du produit MYD11A1 de MODIS fournit chaque jour une image de la surface de la Terre divisée en granules de 1200 x 1200 km. La zone d'étude est à cheval sur deux granules. Ceux-ci ont donc été concatenés puis projetés dans le système de coordonnées UTM19S (Universal Transverse Mercator 19 South) au moyen de l'outil MRT (MODIS Reprojection Tool). Une image quotidienne des Ts de la région des salars, géoréférencée et à résolution kilométrique, a ainsi été obtenue. Au moment de l'étude, ces données étaient disponibles du 01/07/2002 au 25/04/2006 et du 01/01/2007 au 31/12/2007. C'est grâce au logiciel de traitement d'image ENVI 4.2 que cette base de données a été gérée et exploitée.

### *Caractérisation du terrain*

Un modèle numérique de terrain est une image digitale qui délivre une valeur d'altitude pour chaque pixel. La mission radar embarquée sur la navette spatiale de la NASA (Shuttle Radar Topographic Mission ou SRTM) fournit un modèle numérique de terrain (MNT) pour plus de 80% de la surface terrestre et avec une résolution spatiale de 90 m dans le champ horizontal, et une précision de 16 m en altitude (<http://srtm.csi.cgiar.org/>). Une fenêtre correspondant à notre zone d'étude a été extraite de cette base de données. Pour faciliter le changement d'échelle entre une

| <b>Station</b>                            | <b>Période d'enregistrement</b> | <b>Données enregistrées</b>                     |
|---|---------------------------------|---|
| <b>Salinas</b><br><b>19°38'S, 67°40'O</b> | 1989, 1998-2006                 | Tmin et humidité relative minimale journalières |
| <b>Irpani</b><br><b>19°45'S, 67°41'O</b>  | Du 07/01/2006 au 18/02/2006     | Tair et Rn semi-horaires                        |
| <b>Jirira</b><br><b>19°51'S, 67°34'O</b>  | Du 06/11/2006 au 18/12/2007     | Tair, Rg et vitesse du vent<br>semi-horaires    |

**Tableau 2 : principales caractéristiques des trois stations météorologiques ayant servi dans ces travaux**

Tmin =Température minimale de l'air

Tair =Température de l'air

Rn =Rayonnement net

Rg =Rayonnement global

information de Ts kilométrique et l'information orographique, le MNT a été rééchantillonné à 100 m. A chaque donnée de Ts correspondent alors 100 données d'altitude. Le MNT a permis, dans un environnement SIG utilisant les logiciels Idrisi Kilimanjaro, Envi 4.2. et ArcMap 9.2., de décrire les principales caractéristiques orotopographiques de la zone d'étude.

#### *Validation des données MODIS avec les relevés météorologiques in situ*

Les données MODIS offrent une double information : une information qualitative de la présence / absence de nuages au moment de la mesure et une information quantitative de la Ts.

Un certain nombre d'images MODIS ont des masques (Ts aberrantes). Ceci est souvent dû à la présence d'une couche nuageuse entre le satellite et le sol. La présence de nuages le jour de la mesure constitue une information importante pour la problématique de ces travaux puisqu'il n'y a pas de gelée radiative par temps couvert. Cependant, avant d'utiliser cette information il convient de s'assurer que les masques ne proviennent pas d'un dysfonctionnement du satellite. Pour cela, les rayonnements nets (Rn) mesurés au sol lors du passage du satellite sur la station d'Irpani ont été comparés selon que les images MODIS étaient masquées ou non sur le pixel incluant Irpani.

Afin de s'assurer de la fiabilité des Ts MODIS et, le cas échéant, de comprendre la relation entre cette variable et les Tmin mesurées *in situ*, une corrélation a été calculée entre les températures enregistrées à Salinas et Jirira et les Ts MODIS des pixels incluant ces localités. La qualité de la régression a été déterminée par son coefficient de détermination  $r^2$ .

Les données satellitaires (Ts) et météorologiques (Tmin) sont de natures différentes (tableau 3) mais, selon François *et al.* (1999), leurs valeurs numériques ne diffèrent que d'un décalage stable de quelques degrés (nous l'appellerons k).

#### *Construction des cartes de risques*

Un risque est un danger, un inconvénient plus ou moins probable auquel on est exposé. La notion de risque a donc été abordée de manière probabiliste. Cette approche permet de caractériser les moyennes des Ts mais aussi et surtout leur variabilité (écart-type). Le risque a ainsi été défini comme suit :

$$R = \text{Prob} (Ts < 0 \text{ } ^\circ\text{C}) \cdot F$$

- R = Risque de gel
- F = Fréquence de jours sans nuage
- Ts = Température radiative de surface ( $^\circ\text{C}$ )

Pour calculer la probabilité  $\text{Prob} (Ts < 0 \text{ } ^\circ\text{C})$ , la distribution de la variable aléatoire Ts durant la période correspondant à chacune des 3 phases phénologiques a été étudiée pour les pixels incluant les 3 stations météorologiques (Salinas, Jirira et Irpani). Du fait du décalage stable entre Tmin et Ts, la probabilité  $\text{Prob} (Ts < 0 \text{ } ^\circ\text{C})$  est équivalente à la probabilité  $\text{Prob} (Tmin < k \text{ } ^\circ\text{C})$ . La série de six ans de données MODIS utilisée dans ces travaux est trop courte pour un calcul fiable de la probabilité que Ts soit inférieure aux seuils de sensibilité de la quinoa au gel ( $-3 - k \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $-7 - k \text{ } ^\circ\text{C}$  selon la phase phénologique). En effet, cela impliquerait deux sources potentielles d'erreur.

|             | <b>Heure</b> | <b>Hauteur (m)</b> | <b>Résolution (m)</b> |
|-------------|--------------|--------------------|-----------------------|
| <b>Ts</b>   | 2h           | 0                  | 1 000                 |
| <b>Tmin</b> | 6h environ   | 1,5                | 100 environ           |

**Tableau 3 : Les Ts MODIS et les Tmin diffèrent par l'heure et la hauteur de mesure, et leur résolution spatiale**

D'abord, les gelées sont des événements exceptionnels, et par conséquent rarement observés dans la série de données disponible et mal pris en compte dans le calcul des risques. Ensuite, la série de températures observées ne donne qu'une approximation de la distribution de probabilité des Ts, et l'erreur induite serait donc d'autant plus importante que les valeurs des risques seraient faibles. Le choix pour le calcul du risque de gel d'un seuil de 0 °C permet, tout en restant proche de la moyenne de la distribution observée, d'avoir une vision réaliste de la localisation des gradients thermiques et des zones les plus gélives.

Les fonctionnalités de ENVI sont insuffisantes pour répondre à nos besoins d'analyse statistique. L'utilisation de la programmation s'est révélée indispensable pour traiter une telle série temporelle (1866 jours), dans un tel espace (plus de 250 x 350 km) et à une telle résolution (74358 pixels). Une routine a donc été développée sous DELPHI, grâce à la bibliothèque mathématique TP Math ([http://www.unilim.fr/pages\\_perso/jean.debord/tpmath/tpmath.htm](http://www.unilim.fr/pages_perso/jean.debord/tpmath/tpmath.htm)), afin de calculer pour chacun des pixels de 1 km la moyenne et l'écart-type de ses Ts, la fréquence des masquages et le risque de gel pour chacune des phases phénologiques.

Le risque, dont les valeurs vont de 0 à 1, a été converti en nombre de jours de gel en multipliant ce risque par le nombre de jours de la période considérée.

#### *Changement d'échelle à partir de l'orotopographie*

Cette étape synthétisée par la figure 2 est essentielle pour analyser la variabilité spatiale des risques de gel et rendre ces travaux utilisables par les acteurs locaux. L'échelle de l'hectare est bien plus parlante dans une problématique agricole surtout dans le cas de la région des salars, particulièrement accidentée.

À l'aide du MNT SRTM d'une résolution de 100 m, plusieurs indices orotopographiques (figure 3) ont été calculés car ils sont fondamentaux dans leurs relations avec le climat:

- l'altitude
- la latitude
- la pente
- l'exposition

A ces indices couramment employés ont été ajoutés des indices propres à la situation particulière de la zone d'étude. L'influence de ces indices sur les risques de gel a été soit signalée par les acteurs locaux soit observée sur les cartes à résolution kilométrique :

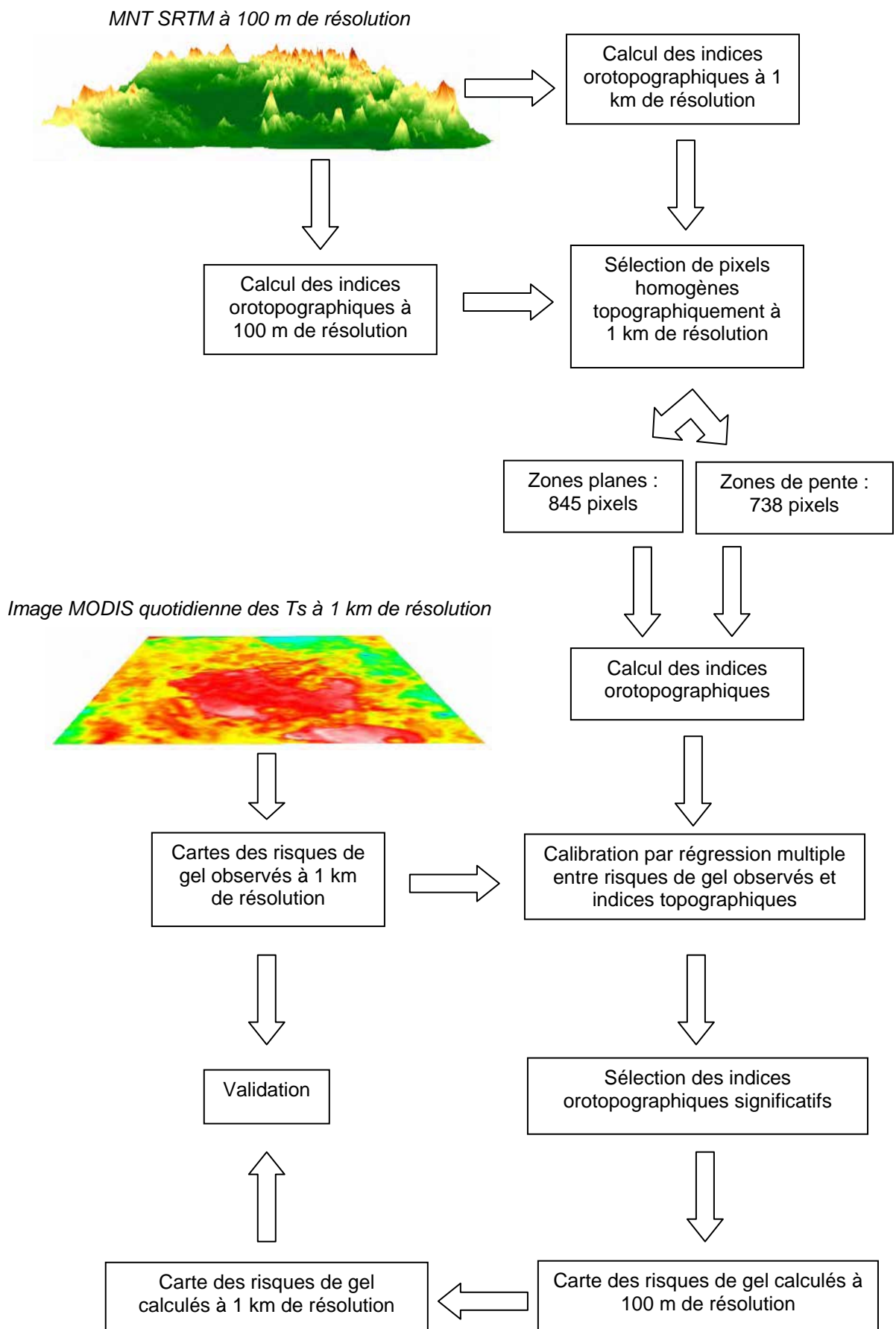
- la distance aux salars, toujours plus chauds la nuit que les terres environnantes
- la distance aux grands reliefs (> 5000 m), pouvant moduler la circulation des masses d'air froid la nuit ainsi que celle des vents et des nuages.

Enfin, un indice supplémentaire, emprunté à l'hydrologie mais montrant sa pertinence dans bien des disciplines, a été ajouté :

- le compound topographic index (CTI) (Moore *et al.*, 1992 ; Gessler *et al.*, 2000) qui quantifie l'écoulement des fluides et peut donc rendre compte du phénomène de coulée adiabatique nocturne.

Deux types de terrain ont aussi été différenciés : les zones de pente (> 7 °) et les zones planes (< 7 °). Pour les zones de pentes, les indices d'inclinaison et d'exposition (nord, est, sud et ouest) ont été ajoutés.

Pour comprendre et quantifier les relations qui existent entre les risques de gel et le terrain, les indices orotopographiques calculés à 100 m de résolution ont été



**Figure 2 : Schéma récapitulatif de la méthode employée pour comprendre et modéliser la dépendance orotopographique des risques de gel permettant le changement d'échelle**

transformés à la même résolution que les risques de gel (1 km). Pour cela, des matrices consécutives de 10 x 10 pixels ont été créées sur l'image à 100 m de résolution, et les valeurs de chaque ensemble de 100 pixels ont été moyennées pour former des pixels de 1 kilomètre de côté. Pour rendre compte de façon certaine de l'influence du terrain sur le climat, les risques de gel n'ont été désagrégés que sur les pixels les moins hétérogènes en termes de pente, d'exposition et d'altitude. Ainsi, pour chaque pixel de 1 km et pour chacun de ces 3 indices orotopographiques, un coefficient d'hétérogénéité a été calculé :

$$CH = [(IT_{km} - IT_{100m})^2 / IT_{km}] \cdot 100$$

|                    |   |
|--------------------|---|
| CH                 | = coefficient d'hétérogénéité   |
| IT <sub>km</sub>   | = moyenne de l'indice topographique pour les 100 pixels de 100 x 100 m constituant chaque pixel de 1 x 1 km |
| IT <sub>100m</sub> | = indice topographique du pixel de 100 x 100 m  |

Ensuite, les 5% de l'ensemble des pixels présentant le CH le plus faible ont été choisis pour étudier la relation entre climat et orotopographie. L'échantillon « pente » était constitué de 738 pixels et l'échantillon « zone plane » de 845 pixels (au total, la zone d'étude, hors salars, comporte 54001 pixels).

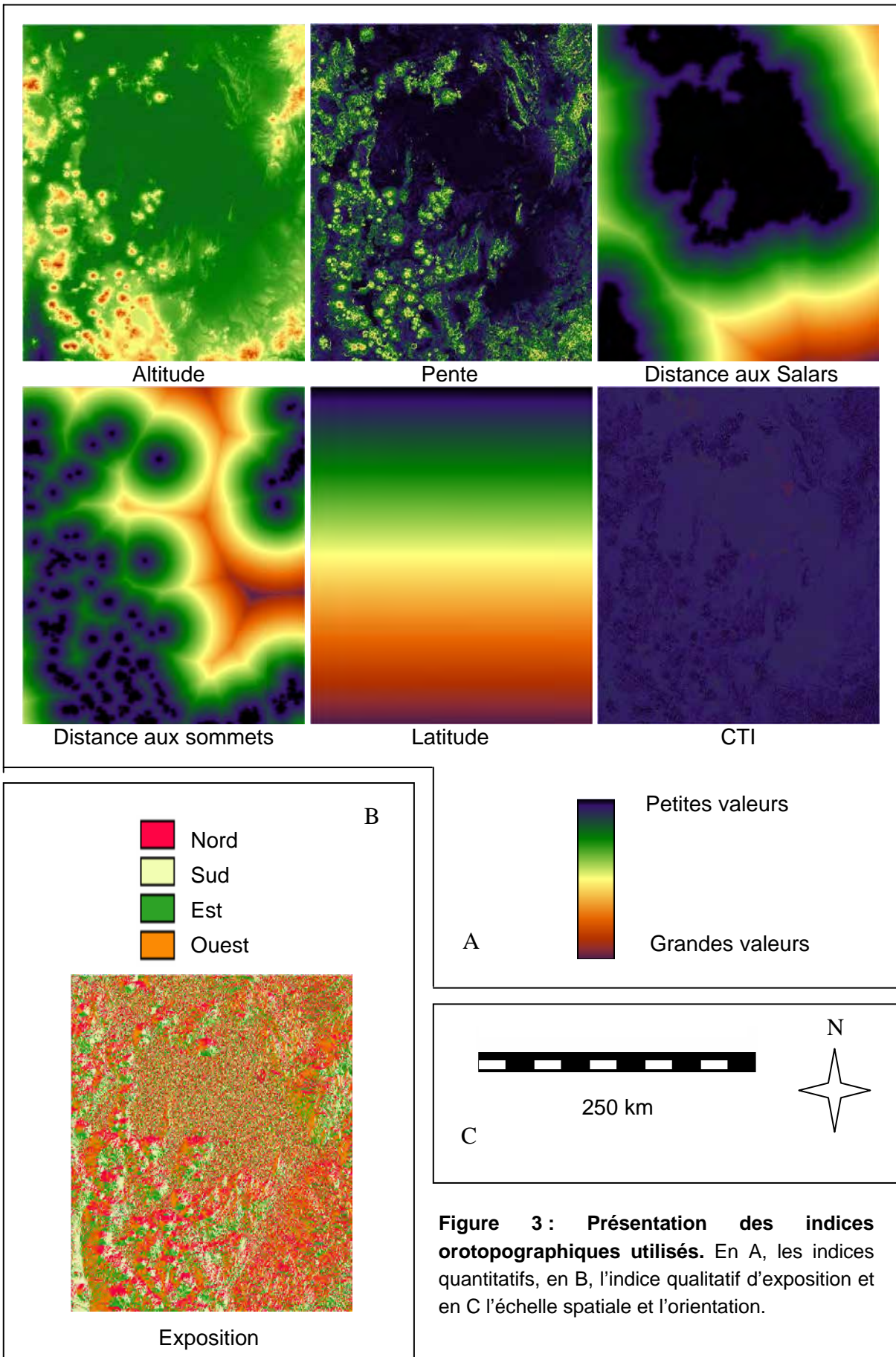
Des régressions multiples ont ensuite été réalisées sous Statistica entre les risques de gel (variable dépendante) et les indices orotopographiques (variables indépendantes) pour chaque phase phénologique, pour chaque type de terrain (plat / pente) et, dans le cas des pentes, pour chaque exposition. La fiabilité de la régression a été exprimée par son coefficient de détermination  $r^2$ . La contribution des indices choisis a été évaluée par un test de Student. S'ils se sont montrés suffisamment explicatifs de la variation des risques de gel, les modèles seront retenus. Ils serviront à interpoler les risques de gel sur les zones se trouvant dans les mêmes configurations orotopographiques sur le MNT à 100 mètres.

La validation des modèles a été effectuée à partir des moyennes des risques de gel prédits par les modèles. Comme précédemment, la résolution des risques estimés a été portée à 1 kilomètre. Puis les moyennes estimées par le modèle ont été comparées aux moyennes observées par télédétection au moyen d'une régression linéaire simple. La fiabilité de la régression a été exprimée par son coefficient de détermination  $r^2$ , son erreur type (Root Mean Square Error ou RMSE), par la p-value du test de Student des différences par paires, par l'équation de la droite de régression et par l'existence et / ou la nature d'un éventuel biais.

Afin de juger de la qualité du calcul des risques de gel et de leur distribution dans l'espace, la carte des risques calculés à 100 m de résolution a été comparée à la carte des Ts mesurées lors d'une nuit particulièrement gélive. Le 5 février 2008, les acteurs locaux ont signalé des gelées ayant touché au moins neuf villages de la zone d'étude. Or, à la fin de notre étude l'image satellitaire de cette date a été rendue disponible. Une régression linéaire simple a donc été opérée entre les risques estimés et les Ts mesurées à cette date.

### *Extension des cultures et risques de gel*

Pour déterminer si l'extension des cultures observée depuis les années 1980 s'est effectivement produite vers des secteurs plus gélifs, l'évolution de la répartition des parcelles agricoles a été mise en relation avec les cartes de risques dans le secteur de



**Figure 3 : Présentation des indices orotopographiques utilisés.** En A, les indices quantitatifs, en B, l'indice qualitatif d'exposition et en C l'échelle spatiale et l'orientation.

Palaya (19°45' S, 68°11' E), considéré comme exemplaire de l'expansion de la frontière agricole. L'extension des cultures a été mise en évidence par l'analyse d'images d'archive de télédétection dans le visible datant de 1963 (photos aériennes, Instituto Geográfico Militar, Bolivie), 1972 (United States Geological Survey) et 2006 (Satellite Pour l'Observation de la Terre, France) (données de Jean-Rémi Duprat, CEFE, CNRS). Ces images ont servi à créer des masques de polygones délimitant les surfaces cultivées à chaque date. Les risques de gel au sein des parcelles agricoles ont alors été calculés par simple multiplication de ces masques par les images des risques estimés à 100 m de résolution dans la période 2002-2007. Les risques moyens de gel sur l'ensemble des parcelles agricoles ont ensuite été calculés pour les trois dates archivées et pour les trois phases phénologiques de la quinoa. Cette procédure fait abstraction de la dérive liée à un éventuel changement climatique et ne retient que les effets de l'orotopographie.

### *Scénarios climatiques*

Le modèle couplé de circulation climatique global CNRM-CM3 (Centre National de Recherches Météorologiques-Coupled global climate Model 3, France) (Salas-Mélia *et al.*, 2005) a fourni les simulations de changements climatiques. Il se base sur le scénario IPCC- SRES A1B (Nakicenovic *et al.*, 2000). Sa résolution de 2 ° en longitude et 0,5 à 2 ° en latitude ne permet pas d'obtenir un point de données au sein même de la zone d'étude. En revanche, deux points sont proches et équidistants de celle-ci. Les estimations CNRM-CM3 des deux points ont alors été moyennées donnant, pour un unique pixel couvrant l'ensemble de la zone d'étude, les températures journalières de l'air (Tmin et Tmax) dans les périodes 1960-2000, 2046-2065 et 2081-2100. Contrairement aux données MODIS, dans ces longues périodes, le jeu de données simulé est continu (pas de masques). Par conséquent, le risque de gel a été simplement abordé comme la fréquence de jours où  $T_{min} < k$  °C, fréquence calculée pour chaque phase phénologique et, pour s'affranchir du bruit des variations annuelles, par intervalles de 5 ans. Un essai de validation des estimations du modèle CNRM-CM3 a été réalisé en remplaçant dans la série temporelle issue des scénarios les risques moyens calculés sur l'ensemble de la zone d'étude à partir des images MODIS pour la période 2002-2007. Ensuite, pour spatialiser l'évolution des risques de gel aux horizons 2050 et 2100, les différences entre les risques de gel présents et futurs données par les scénarios aux différentes phases phénologiques ont été soustraites aux cartes de risques actuels à 100 m de résolution. Ce procédé a été choisi car il est objectif et la seule étude propre aux conditions climatiques originales des Andes à s'être intéressé à l'évolution passée de la relation entre climat et topographie (Vuille & Bradley, 2000) montre que, aux altitudes permettant la culture de la quinoa (< 4200 m), cette évolution est négligeable (variant de 0 à 0,1 °C en 100 ans). De plus, l'évolution de l'importance relative des indices orotopographiques, propres à la zone d'étude, est impossible à anticiper.

## **Résultats**

### *Analyse fréquentielle des températures minimales*

A Salinas, en 1989 et entre 1998 et 2006, le stade critique de floraison est positionné dans la période non-gélive de l'année (figure 4). Cette période est d'environ 90 jours. Il persiste donc un risque gel en début du stade de croissance (0,10 au seuil de -3° C) et

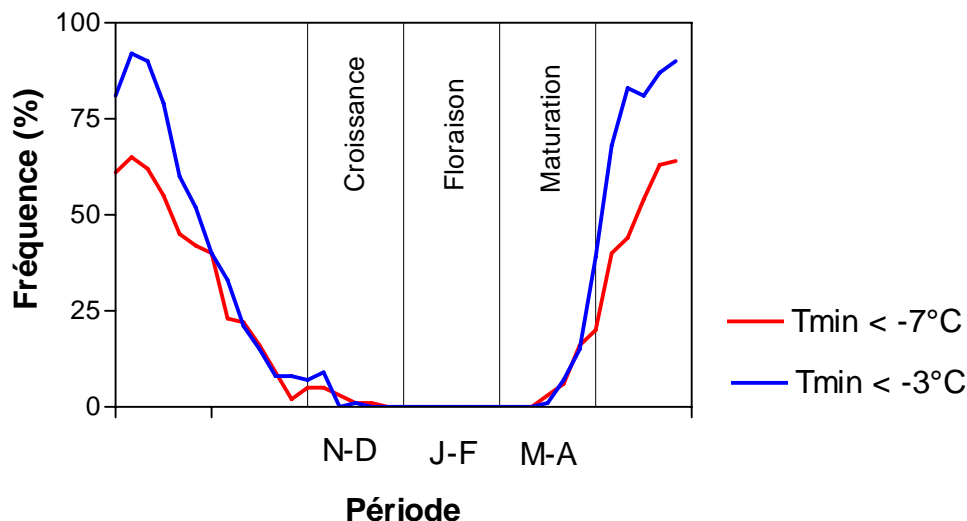


Figure 4 : Analyse fréquentielle de températures minimales enregistrées à Salinas en 1989 et de 1998 à 2006 en fonction de la période (N-D = novembre-décembre, J-F = janvier-février, M-A = mars-avril) et stade phénologique associés. En rouge,  $T_{min} < -7^{\circ}\text{C}$ , en bleu :  $T_{min} < -3^{\circ}\text{C}$  (d'après Lebonvallet , 2008).

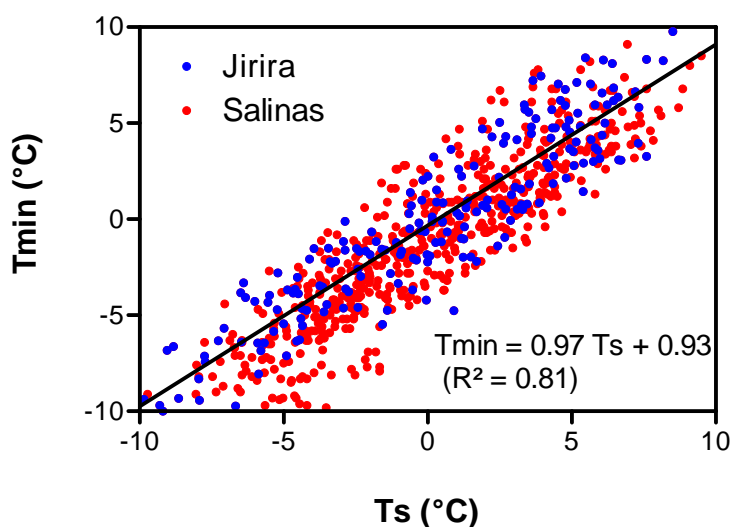


Figure 5a : Régression entre  $T_s$  et  $T_{min}$  pour les stations de Jirira (en bleu) et Salinas (en rouge) ( $n = 750$ ).

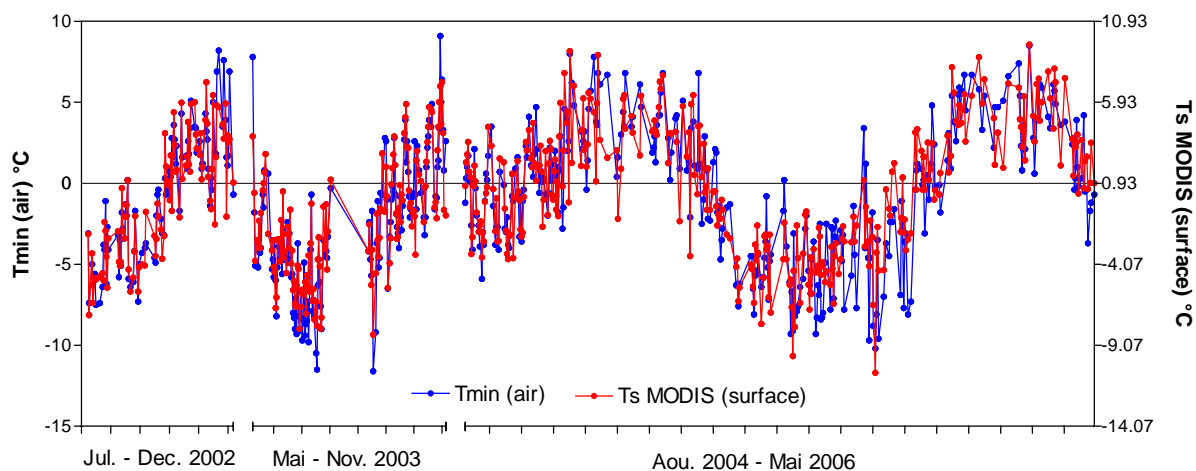


Figure 5b : Chronique comparative (discontinue) des  $T_{min}$  (en bleu) et  $T_s$  (en rouge) pour la station de Salinas ( $n = 555$ ).

la fin du stade de maturation (jusqu'à 0,40). La station de Salinas peut ne pas être représentative de la diversité des situations rencontrées dans la zone et ses données peuvent ne pas rendre compte des événements ponctuels et sensibles aux conditions locales que l'on cherche à approcher.

#### *Validation des données MODIS*

Le masquage des images MODIS est efficace. En effet, lorsque Aqua détecte la présence de nuages, le  $R_n$  moyen au sol est de  $-36 \pm 17 \text{ W m}^{-2}$  tandis qu'il est de  $-96 \pm 30 \text{ W m}^{-2}$  en absence de masquage soit une valeur presque trois fois inférieure qui traduit des pertes radiatives élevées par temps clair.

La régression linéaire simple entre les  $T_{min}$  et  $T_s$  de Salinas et Jirira présentée en figure 5a montre une bonne corrélation ( $r^2 = 0,81$ ). L'existence d'un biais relatif et l'absence de biais absolu prouve que l'équation de cette relation est assimilable à  $T_{min} = T_s + 0,93 \text{ °C}$ . Les deux variables, dans l'intervalle  $[-10 \text{ °C} ; 10 \text{ °C}]$ , ne diffèrent donc que d'un décalage stable de  $0,93 \text{ °C}$ . Par conséquent, le risque de gel tel qu'il a été calculé correspond aussi au risque pour que  $T_{min} < 0,93 \text{ °C}$  ( $k = 0,93$ ). La figure 5b illustre bien la variation intrannuelle, saisonnière comme journalière, des  $T_{min}$  dans la région des salars et donc la dimension temporelle du risque de gel. L'amplitude annuelle des  $T_{min}$  est de l'ordre de  $15 \text{ °C}$ . A Salinas, les  $T_{min}$  sont généralement négatives durant l'hiver austral et positives pendant l'été. Cette figure expose également la stabilité temporelle de la relation entre  $T_{min}$  et  $T_s$ . Les seules périodes pour lesquelles cette stabilité est discutable correspondent soit à des jours sans gelée soit à l'hiver où la culture de la quinoa ne se pratique pas.

#### *Construction des cartes de risques*

Pour tester la normalité de la distribution des  $T_s$ , deux tests ont été effectués : le test de Kolmogorov-Smirnov et celui de Shapiro-Wilk (plus puissant).

Le test de Shapiro-Wilk a montré dans 66% des cas que les  $T_s$  suivaient une loi normale au seuil de 5%. Dans le cas contraire, le test de Kolmogorov-Smirnov s'est lui toujours montré significatif à ce même seuil.

Les mois de janvier-février sont les plus nuageux. En effet, les images MODIS de cette période ont en moyenne  $46 \pm 8,2\%$  de leur surface masquée alors qu'elle n'est que de  $30 \pm 7,4\%$  en novembre-décembre et  $29 \pm 6,6\%$  en mars-avril. Cette tendance est d'ailleurs visible sur les histogrammes de fréquence (Annexe 2) qui montrent que, pendant les mois de janvier-février, les  $T_s$  disponibles sont plus rares.

Les cartes de probabilité d'occurrence de valeurs inférieures à  $0 \text{ °C}$  construites grâce à cette distribution facilement exploitable, par simple calcul de la moyenne et de l'écart-type des  $T_s$ , suggèrent d'emblée l'influence de facteurs orotopographiques sur les risques de gel, en particulier les effets d'exposition, de proximité des salars et d'altitude, directement visibles (Annexe 3). La latitude est aussi un facteur important car de manière globale il fait plus chaud au nord qu'au sud de l'altiplano. La différence entre les zones planes, fréquemment gélives, et les pentes, plus chaudes, est également flagrante.

**Tableau 4 : Coefficients multiplicateurs des indices orotopographiques issue de la calibration des modèles pour les différentes configurations spatiales et pour les trois phases phénologiques.** Le r<sup>2</sup> de chaque régression multiple est présenté. Le CTI est sans unité.

\*en m  
**Significatif à 5%**  
 Non significatif

| novembre-décembre |                |                       |                             |                             |                             |                              |                              |                              |
|-------------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Zone de pente     |                |                       |                             |                             |                             |                              |                              |                              |
| exposition        | r <sup>2</sup> | Ordonnée 0            | Altitude*                   | Latitude (système UTM-19S)  | CTI                         | Log (distance salars)*       | Log(distance sommets)*       | Pente (°)                    |
| N                 | 0,81           | 2,51                  | <b>1,75.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,91.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,37.10<sup>-2</sup></b> | <b>2,95.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-6,41.10<sup>-3</sup></b> | -3,77.10 <sup>-2</sup>       |
| E                 | 0,76           | 9,05.10 <sup>-1</sup> | <b>2,00.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,91.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,80.10<sup>-2</sup></b> | <b>2,40.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-2,55.10<sup>-3</sup></b> | -2,10.10 <sup>-2</sup>       |
| S                 | 0,74           | 4,38.10 <sup>-1</sup> | <b>2,30.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,11.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,94.10<sup>-2</sup></b> | <b>1,76.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-1,21.10<sup>-3</sup></b> | -1,84.10 <sup>-2</sup>       |
| O                 | 0,65           | <b>4,52</b>           | <b>2,04.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,67.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,86.10<sup>-2</sup></b> | <b>2,94.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-1,71.10<sup>-3</sup></b> | <b>-6,11.10<sup>-2</sup></b> |
| Zone plane        |                |                       |                             |                             |                             |                              |                              |                              |
|                   | 0,46           | <b>-1,01</b>          | <b>2,77.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,51.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,13.10<sup>-2</sup></b> | 6,00.10 <sup>-3</sup>        | <b>-1,31.10<sup>-4</sup></b> | -                            |
| janvier-février   |                |                       |                             |                             |                             |                              |                              |                              |
| Zone de pente     |                |                       |                             |                             |                             |                              |                              |                              |
| exposition        | r <sup>2</sup> | Ordonnée 0            | Altitude*                   | Latitude                    | CTI                         | Log (distance salars)*       | Log(distance sommets)*       | Pente (°)                    |
| N                 | 0,87           | <b>4,00</b>           | <b>3,36.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,36.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,18.10<sup>-2</sup></b> | <b>2,36.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-6,70.10<sup>-3</sup></b> | <b>-6,16.10<sup>-2</sup></b> |
| E                 | 0,84           | 7,81.10 <sup>-1</sup> | <b>3,80.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,64.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,53.10<sup>-2</sup></b> | <b>1,72.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-2,60.10<sup>-3</sup></b> | <b>-2,85.10<sup>-2</sup></b> |
| S                 | 0,81           | 8,15.10 <sup>-1</sup> | <b>4,66.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,64.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,69.10<sup>-2</sup></b> | <b>1,93.10<sup>-2</sup></b>  | <b>-1,27.10<sup>-3</sup></b> | <b>-3,46.10<sup>-2</sup></b> |
| O                 | 0,76           | <b>3,20</b>           | <b>4,86.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,07.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,86.10<sup>-2</sup></b> | <b>1,94.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-1,41.10<sup>-3</sup></b> | <b>-6,07.10<sup>-2</sup></b> |
| Zone plane        |                |                       |                             |                             |                             |                              |                              |                              |
|                   | 0,72           | <b>-2,290</b>         | <b>5,63.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,13.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,03.10<sup>-2</sup></b> | <b>-6,60.10<sup>-2</sup></b> | <b>5,60.10<sup>-5</sup></b>  | -                            |
| mars-avril        |                |                       |                             |                             |                             |                              |                              |                              |
| Zone de pente     |                |                       |                             |                             |                             |                              |                              |                              |
| exposition        | r <sup>2</sup> | Ordonnée 0            | Altitude*                   | Latitude                    | CTI                         | Log (distance salars)*       | Log(distance sommets)*       | Pente (°)                    |
| N                 | 0,85           | <b>3,80</b>           | <b>2,63.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,67.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,07.10<sup>-2</sup></b> | <b>2,52.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-6,25.10<sup>-3</sup></b> | <b>-5,61.10<sup>-2</sup></b> |
| E                 | 0,8            | 1,34                  | <b>2,45.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,66.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,19.10<sup>-2</sup></b> | <b>1,93.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-3,07.10<sup>-3</sup></b> | <b>-2,68.10<sup>-2</sup></b> |
| S                 | 0,77           | 4,50.10 <sup>-1</sup> | <b>2,72.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,78.10<sup>-4</sup></b> | <b>2,27.10<sup>-2</sup></b> | <b>1,36.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-1,32.10<sup>-3</sup></b> | -1,89.10 <sup>-2</sup>       |
| O                 | 0,67           | <b>3,59</b>           | <b>2,72.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,29.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,28.10<sup>-2</sup></b> | <b>2,80.10<sup>-1</sup></b>  | <b>-1,56.10<sup>-3</sup></b> | <b>-5,26.10<sup>-2</sup></b> |
| Zone plane        |                |                       |                             |                             |                             |                              |                              |                              |
|                   | 0,50           | <b>-1,21</b>          | <b>3,36.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,32.10<sup>-4</sup></b> | <b>1,69.10<sup>-2</sup></b> | <b>-9,00.10<sup>-3</sup></b> | <b>1,12.10<sup>-4</sup></b>  | -                            |

### *Influence de l'orotopographie sur les risques de gel*

Les régressions multiples montrent que l'altitude, la latitude et le CTI expliquent toujours une part significative de la variation des risques de gel dans la région des salars (tableau 4). La distance aux salars est une variable significative en janvier-février et mars-avril ainsi que sur les zones de pente en novembre-décembre. A cette période, sur les zones planes, cet indice n'a par contre pas d'effet significatif. Ces quatre indices sont corrélés de manière positive avec le risque de gel ce qui signifie que plus ils sont grands, plus le risque de gel est important. La distance aux sommets est constamment significative. La forte contribution de la distance aux sommets sur les versants nord (tableau 4) peut s'expliquer par sa corrélation avec la latitude (tableau 5). L'inclinaison de la pente, quant à elle, est significative en janvier-février, en mars-avril, mis à part sur les versants Sud et, en novembre-décembre, uniquement sur les versants ouest. Ces deux derniers indices sont corrélés négativement aux risques de gel. Les régressions multiples ainsi réalisées expliquent une part satisfaisante de la variation des risques, particulièrement dans les zones de pente.

D'après les coefficients de corrélations deux à deux de Pearson (tableau 5), l'altitude est l'indice le plus explicatif de la variation spatiale des risques de gel en novembre-décembre ( $r^2 = 0,60$ ) et en janvier-février ( $0,76$ ). En mars-avril, la corrélation des risques de gel avec l'altitude ( $0,67$ ) est équivalente à celle avec la latitude ( $0,69$ ). La pente a une faible influence sur la répartition des températures de novembre à avril. Son coefficient de corrélation non-négligeable, ( $0,15$  ;  $0,24$  ;  $0,19$  pour les 3 périodes successives) est certainement dû au fait qu'elle est une entrée du calcul du CTI, mieux corrélé aux risques de gel ( $0,21$  ;  $0,29$  ;  $0,24$  respectivement). La distance aux sommets est bien corrélée aux risques de gel ( $-0,51$  ;  $-0,66$  ;  $-0,58$ ) certainement parce qu'elle est également bien corrélée avec l'altitude, la latitude, la pente et le CTI ( $-0,81$  ;  $-0,34$  ;  $-0,38$  ;  $0,46$  respectivement). Distance aux sommets et risques de gel sont inversement proportionnels ce qui signifie que plus les parcelles seront loin des sommets, moins elles seront exposées au gel. La distance aux salars s'avère être également un indice pertinent ( $0,54$  ;  $0,47$  ;  $0,46$  pour les 3 phases phénologiques). Peu corrélée aux autres indices, elle est donc un facteur explicatif important de la variation spatiale des risques de gel. Enfin, la forte corrélation entre les risques de gel des trois phases phénologiques démontre la stationnarité des zones gélives.

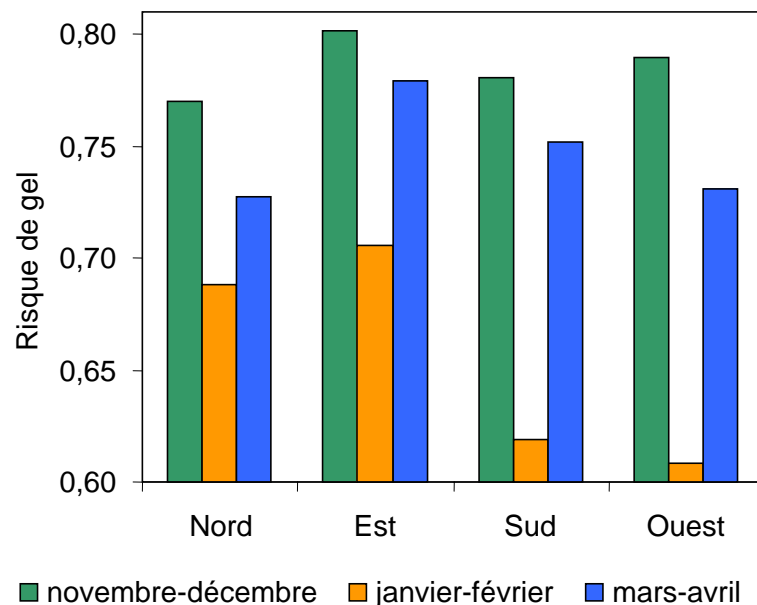
La figure 6 illustre les variations temporelles et spatiales des risques de gel. Les mois de novembre-décembre sont les plus froids puis suivent les mois de mars-avril et enfin janvier-février. L'influence de l'exposition dépend de la période considérée. Les versants nord sont les plus chauds en novembre-décembre et mars-avril tandis qu'en janvier-février, ce sont les versants ouest et, paradoxalement, sud moins ensoleillés, qui sont les moins exposés au gel.

Les risques de gel estimés sont bien corrélés avec ceux observés (tableau 6). Bien que ces régressions aient des valeurs de RMSE relativement élevées, les coefficients des droites de régression, l'absence systématique de biais, les valeurs de  $r^2$  et surtout le test de Student des différences par paires (non-significatif au seuil de 5%) sont satisfaisants. Le modèle utilisé en janvier-février est le meilleur ( $r^2 = 0,79$ ), ensuite suit celui de mars-avril ( $r^2 = 0,70$ ) puis celui de novembre-décembre ( $r^2 = 0,65$ ) (annexe 4).

Le coefficient de détermination de la relation entre les risques estimés et les Ts du 5 février 2008 est de  $0,83$  (annexe 5). Le test de Student des différences par paires donne une p-value  $< 5\%$ .

|                     | Altitude | Latitude (UTM19s) | Pente | CTI  | Log (dist. sommets) | Log (dist. salars) | Risque Nov-Déc | Risque Jan-Fév | Risque Mar-Avr |
|---------------------|----------|-------------------|-------|------|---------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| Altitude            | 1        |                   |       |      |                     |                    |                |                |                |
| Latitude            | 0,35     | 1                 |       |      |                     |                    |                |                |                |
| Pente               | 0,49     | 0,03              | 1     |      |                     |                    |                |                |                |
| CTI                 | -0,59    | 0,16              | -0,59 | 1    |                     |                    |                |                |                |
| Log (dist. sommets) | -0,81    | -0,34             | -0,38 | 0,46 | 1                   |                    |                |                |                |
| Log (dist. salars)  | 0,37     | 0,29              | 0,12  | 0,06 | -0,32               | 1                  |                |                |                |
| Risque Nov-Déc      | 0,6      | 0,6               | 0,15  | 0,21 | -0,51               | 0,54               | 1              |                |                |
| Risque Jan-Fév      | 0,76     | 0,49              | 0,24  | 0,29 | -0,66               | 0,47               | 0,92           | 1              |                |
| Risque Mar-Avr      | 0,67     | 0,69              | 0,19  | 0,24 | -0,58               | 0,46               | 0,98           | 0,95           | 1              |

**Tableau 5 :  $r^2$  de la matrice des corrélations partielles entre les 6 indices orotopographiques retenus et les risques de gel associés aux trois phases phénologiques de la quinoa pour les zones de pente (n = 738).**



**Figure 6 : Risque de gel en fonction de l'exposition et de la phase phénologique de la quinoa pour les zones de pente (n = 738).**

### *Changement d'échelle à partir de l'orotopographie*

Les cartes de risque de gel à 100 m de résolution (figure 7) révèlent une forte hétérogénéité au sein même de pixels de 1 km<sup>2</sup>, surtout dans les zones de pente.

L'impact de l'orotopographie est encore d'avantage marqué à cette échelle plus fine. Ces cartes illustrent la variation spatiale, dépendante de l'orotopographie, et temporelle des zones gélives. Bien que les mois de janvier-février soient les plus chauds de l'année, le risque de gel n'est jamais nul. En novembre-décembre, les zones les moins gélives se trouvent au nord de la zone d'étude, en janvier-février, elles se situent en périphérie du Salar d'Uyuni tandis qu'en mars-avril elles sont plutôt à l'est de ce salar.

La figure 8 illustre également le déterminisme orotopographique des risques de gel à l'échelle du paysage. En effet, l'influence de trois indices y est discernable : le risque de gel augmente avec l'altitude ; les zones de bas de pente, ayant un CTI marqué, présentent un risque important de gel alors que les zones de bas de pente mais situées à moins de 1 km de la rive du salar sont peu gélives. Les risques de gel et leurs variations temporelles sont particulièrement accentués dans les zones de bas de pente, spécifiquement, en novembre-décembre où 100% des nuits sont exposées à des températures négatives.

### *Extension des cultures et risques de gel*

Depuis 1963, la surface consacrée à la culture de la quinoa à Palaya a triplé (figure 9a). Bien que les parcelles situées depuis 1963 sur les pentes des reliefs aient été maintenues en culture, cette extension s'est surtout produite vers les bas de pente. Sans même tenir compte du réchauffement climatique, les risques de gel moyens n'ont pourtant quasiment pas évolué et ont même légèrement diminué en début et fin de cycle de culture (Figure 9b). Cette diminution est probablement liée au fait que les cultures se sont étendues vers le sud-est du terroir, en direction du Salar d'Uyuni dont elles ne sont séparées que par moins d'un kilomètre. Il est intéressant de noter une fois de plus l'hétérogénéité spatiale des risques de gel ainsi que les effets ponctuels de l'exposition au soleil, au vent et / ou aux masses d'air en provenance du salar.

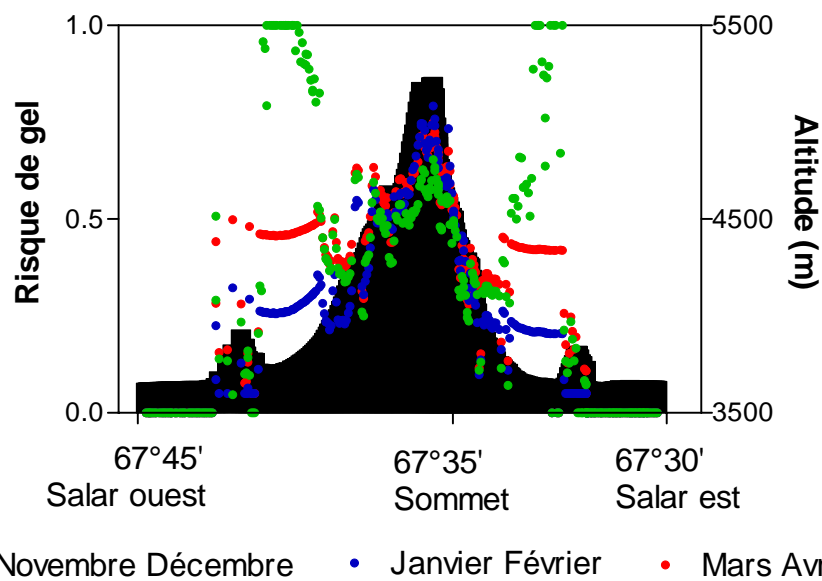
### *Conséquences attendues des changements climatiques*

Le modèle CNRM-CM3 prédit une élévation linéaire (bien que bruitée) des T<sub>min</sub> et des T<sub>max</sub> de l'ordre de 3 °C entre 1980 et 2100 pour les trois phases phénologiques (figure 10). La variabilité de ces températures aura également tendance à augmenter à la vue des écart-types croissants. L'amplitude thermique journalière n'augmentera que très peu en janvier-février et mars-avril. Une augmentation supérieure est notable pour les mois de novembre-décembre. A l'échelle régionale, une diminution des risques de gel sur toute la période de culture de la quinoa est donc à prévoir (figure 11). Cette baisse est de 35% en novembre-décembre, 96% en janvier-février et 27% en mars-avril entre aujourd'hui et 2100.

C'est pourquoi les cartes simulées (figure 7) présentent de nouvelles zones exemptes de risque de gel ou faiblement impactées. Cette extension se fait selon un gradient latitudinal nord-sud et altitudinal des zones basses vers les zones hautes. En mars-avril, les zones où les T<sub>s</sub> sont toujours inférieures à 0 °C à 2h restent confinées aux sommets des reliefs à l'horizon 2050 et disparaissent en 2100. Les zones les moins sujettes au gel sont réparties en périphérie du Salar d'Uyuni. En novembre-décembre, les zones gélives toutes les nuits disparaissent dès 2050 et ne présentent

|                        | novembre-décembre           | janvier-février             | mars-avril                  |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $r^2$                  | 0,65                        | 0,79                        | 0,70                        |
| p-value (t-test)       | < 0,05                      | < 0,05                      | < 0,05                      |
| RMSE                   | 0,16                        | 0,24                        | 0,17                        |
| Equation de régression | 1,04x + 0,01<br>aucun biais | 0,96x + 0,02<br>aucun biais | 1,06x + 0,07<br>aucun biais |

**Tableau 6 : Validation des modèles d'estimation des risques de gel**



**Figure 8 : Evolution du risque de gel le long d'un transect Ouest-Est du volcan Tunupa.** En vert sont représentés les risques de novembre-décembre, en bleu ceux de janvier-février et en rouge ceux de mars-avril. L'altitude est représentée par le profil topographique en noir. A cette latitude, 0°15' équivaut à 30 km.

plus au maximum que 42 à 48 jours de gel sur ces deux mois. Quant aux zones les moins souvent froides, elles se trouvent au nord de la zone d'étude et à l'est du Salar d'Uyuni. En janvier-février, on observe une disparition quasi-totale, dès 2050, du risque de gel.

## Discussion

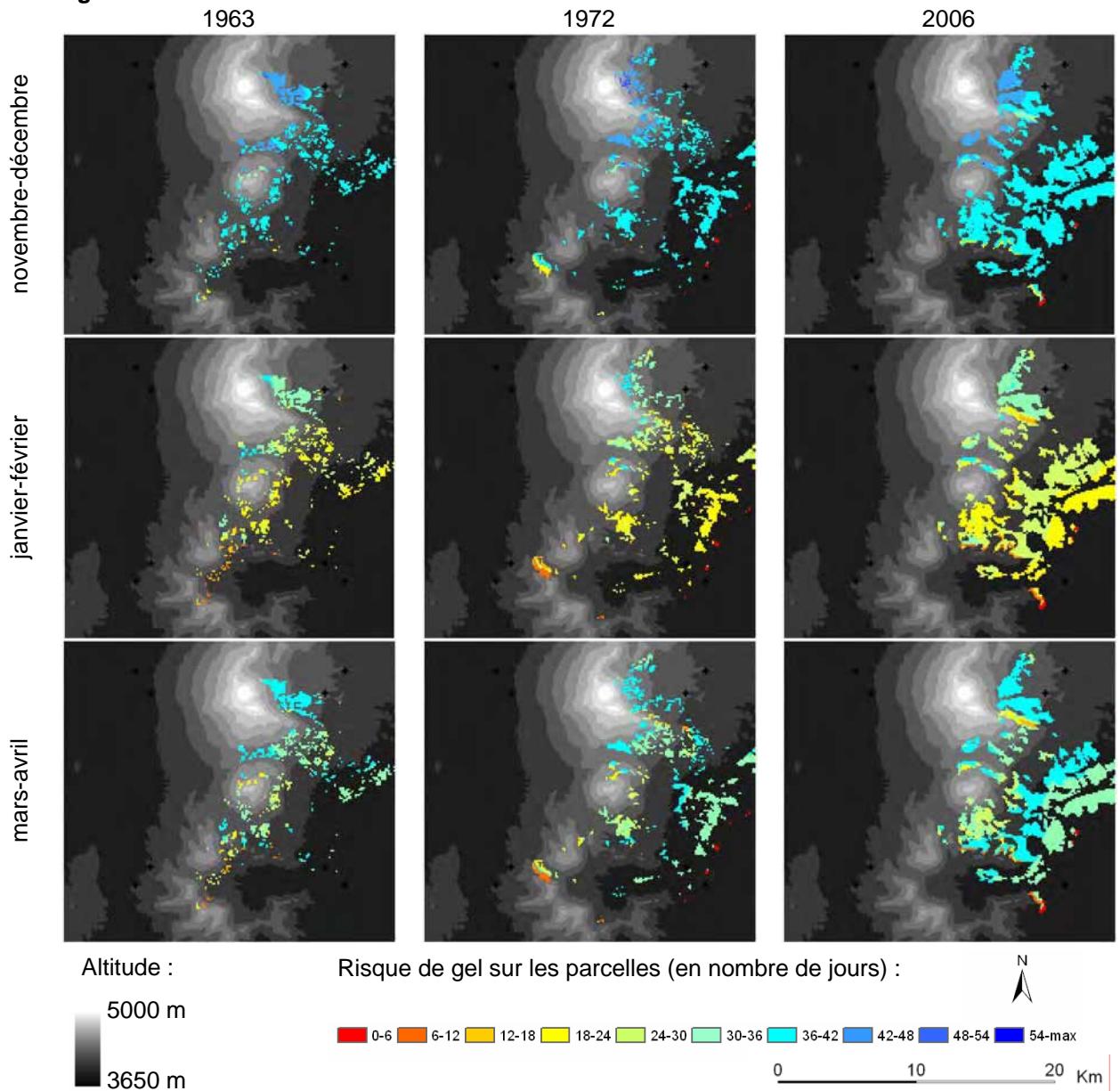
### *Variations temporelles des risques de gel*

Le climat tropical andin est caractérisé par des variations de températures journalières supérieures à ses variations saisonnières. Ces amplitudes thermiques extrêmes constituent le principal facteur de stress environnemental pour les plantes naturelles et cultivées de cet habitat (Rundel et al., 1994). Centré sur la période la moins risquée de l'année en termes de pluviométrie et de température, le cycle de développement de la quinoa paraît bien adapté aux conditions météorologiques andines. Les seuils de sensibilité au gel de ses différentes phases phénologiques sont en relation directe avec les dynamiques climatiques de son écosystème natif. Celles-ci modulent le forçage biophysique auquel est soumise la culture, en affectant notamment la température et la nébulosité. Ces deux paramètres atteignent leur maximum en janvier et février, réduisant sensiblement les risques de gelées radiatives sans toutefois les annuler complètement.

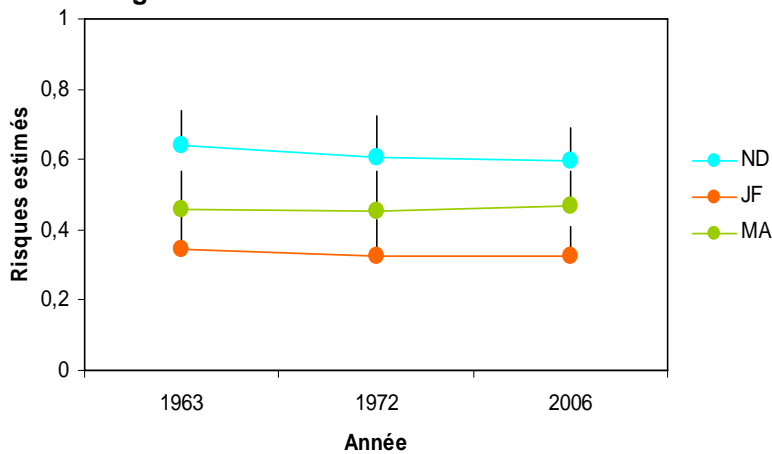
La caractérisation de leurs variations spatiales et temporelles est donc essentielle à l'estimation des risques de gel. Or, la télédétection satellitaire et en particulier la technologie MODIS renseigne de façon continue et fiable sur ces deux éléments. En effet, les  $R_n$  mesurés au sol en concomitance avec le passage du satellite prouvent son efficacité quant à la détection de nuages. Les nuits claires, le  $R_n$  moyen à 2h atteint  $-96 \text{ W m}^{-2}$  alors qu'il est de  $-36 \text{ W m}^{-2}$  les nuits nuageuses. Ces valeurs sont en accords avec celles de Moulin (1994). En l'absence de nuages, les  $T_s$  mesurées par le satellite sont corrélées linéairement et de façon très significative avec les  $T_{min}$  mesurés au sol, plus couramment employés dans l'étude des risques de gel pour les cultures. Deux effets antagonistes interviennent dans cette relation. Le premier, temporel, est dû au fait que la température à 2h ( $T_s$ ) est généralement plus douce que la température à 6h ( $T_{min}$ ). Le second, spatial, est dû à la différence de hauteur entre les deux températures :  $T_s$ , au contact de la surface, est plus froide que  $T_{min}$ , à 1,5 m dans l'air. L'ordonnée à l'origine positive montre que, à Salinas et Jirira, l'effet du décalage de hauteur entre les deux types de données est plus important que celui de leur différence temporelle. Ces valeurs sont en accord avec celles de François *et al.* (1999) et Le Tacon *et al.* (1992). La variation non expliquée par la droite de régression est imputable aux différences temporelles et d'échelle entre les deux types de donnée.

Malgré une série de données satellitaires insuffisante pour évaluer quantitativement le risque que la quinoa gèle, le calcul des risques tel qu'il a été abordé dans ces travaux s'est avéré pertinent. En effet, d'après la bonne corrélation qui existe entre ces risques et les  $T_s$  du 5 février 2008 (annexe 4), il semble que les processus mis en jeu lors des événements extrêmes soient bien cernés par cette approche. Cette comparaison a mis en évidence la stationnarité des zones gélives dans la région des salars et le fait que les zones les plus exposées aux épisodes de gel étaient aussi les zones les plus froides. Cette stationnarité suggère que les facteurs topographiques (fixes) dominant sur ceux liés à la circulation atmosphérique (variables) dans la détermination des variations spatiales des risques de gel.

**Figure 9a**



**Figure 9b**



**Figure 9 : Risques de gel et expansion des cultures à Palaya entre 1963, 1972 et 2006 pour les trois phases phénologiques de la quinoa (ND = novembre-décembre, JF = janvier-février, MA = mars-avril). Répartition spatiale (9a) et moyennes sur l'ensemble du territoire (9b). En (a), l'altitude et le risque de gel sont exprimés par deux jeux de couleurs distincts. En (b) les barres verticales représentent les écart-types.**

### *Variations spatiales des risques de gel*

La topographie du terrain et sa distribution dans l'espace modulent les flux d'énergie. La méthode employée pour comprendre et quantifier l'effet de l'orotopographie sur le climat local est justifiée par l'évolution saisonnière des températures et leurs variations selon la configuration du terrain (zones de pente / zones plane, expositions). Cette méthode s'est avérée efficace.

Les versants les moins sujets, en moyenne, au gel en novembre, décembre, mars et avril sont ceux exposés au nord (figure 6). Il est intéressant de noter qu'ils bénéficient aussi d'une plus grande durée d'ensoleillement et sont ensoleillés aux heures les plus chaudes dans l'hémisphère sud. Là aussi deux phénomènes s'opposent. D'abord, les versants ayant accumulé le plus de chaleur diurne perdent plus de chaleur la nuit de par le gradient énergétique qui demeure entre le sol et les couches d'air supérieures. Le second effet, dominant ici, est simple : à déperdition de chaleur égale, un versant plus chaud au coucher du soleil aura tendance à le rester au matin suivant. En janvier et février, les versants ouest et sud sont plus chauds. Cette observation est vraisemblablement due à l'existence d'un vent dominant provenant du sud-ouest à cette époque (Frère, 1978) qui brasserait les couches d'air et empêcherait la stagnation d'air froid sur ces versants. L'exposition aux vents est par conséquent un facteur bien plus important que l'exposition au soleil en été.

L'altitude apparaît comme le facteur quantitatif prédominant comme le signalent Blennow & Perssen (1998), Daly et al. (2002) et Lookingbill *et al.* (2002). Le refroidissement de l'air proportionnel à l'altitude est dû à l'induction graduelle de chaleur de la Terre vers l'atmosphère et à la détente adiabatique de l'air proportionnelle à la diminution de pression. Du fait de l'extension de la zone d'étude, la latitude s'avère aussi significativement explicative de la variation spatiale des risques de gel pour la quinoa. La distance aux salars est un autre paramètre d'importance. Ces vastes étendues salines ont un effet tampon, particulièrement prononcé jusqu'à 1 km de leur rive, vraisemblablement à cause de l'eau qui les recouvre en partie en janvier et février et / ou à cause de la conductivité et capacité thermique du sel. François *et al.* (1999) observent le même phénomène qui peut, en partie, expliquer l'essor remarquable de la culture de la quinoa dans cette région précise de l'altiplano. Cet indice orographique est corrélé de manière logarithmique aux risques de gel tout comme la distance aux sommets. Celle-ci paraît n'être qu'une composante d'autres descripteurs, principalement de l'altitude et de la latitude. De même, la pente et le CTI semblent expliquer des dynamiques identiques. Les phénomènes d'inversion thermique nocturne s'expliquent par le processus de drainage catabatique. Ce flux très dépendant de la topographie intéresse des couches d'air de plusieurs mètres d'épaisseur qui s'écoulent gravitairement le long des pentes à une vitesse à peine perceptible (Durand, 1978 *in* De Bouet du Portal, 1993). Il se forme alors de véritables lacs d'air froid au fond des vallées (Seguin, 1975). Le Tacon (1991) a ainsi mis en évidence des différences allant jusqu'à 10 °C entre deux parcelles de pente et de bas-fonds distantes de quelques centaines de mètres seulement. Mais l'extension des parcelles de Palaya vers les zones planes en bordures du Salar d'Uyuni, présentant les mêmes risques de gel que les pentes adjacentes (figure 9a et 9b) démontre que les coulées nocturnes d'air froid n'arrivent que dans des conditions propices et peuvent être fortement atténuées par d'autres facteurs orotopographiques. Dans cet exemple, les cultures de quinoa ont été étendues des pentes orientées à l'est, versants les plus froids pendant toute la saison de culture, vers les zones planes, plus longtemps exposées au soleil et bénéficiant de l'influence du salar.

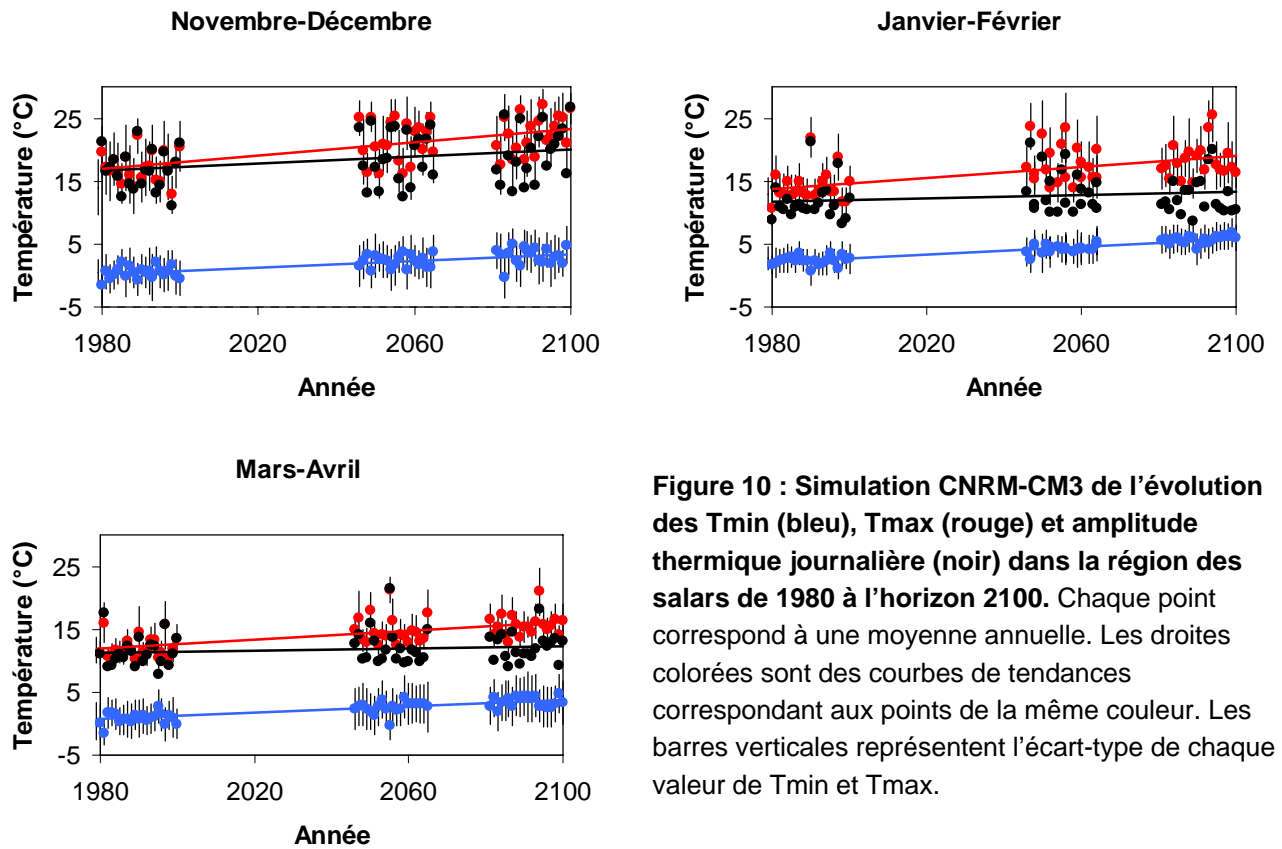


Figure 10 : Simulation CNRM-CM3 de l'évolution des T<sub>min</sub> (bleu), T<sub>max</sub> (rouge) et amplitude thermique journalière (noir) dans la région des salars de 1980 à l'horizon 2100. Chaque point correspond à une moyenne annuelle. Les droites colorées sont des courbes de tendances correspondant aux points de la même couleur. Les barres verticales représentent l'écart-type de chaque valeur de T<sub>min</sub> et T<sub>max</sub>.

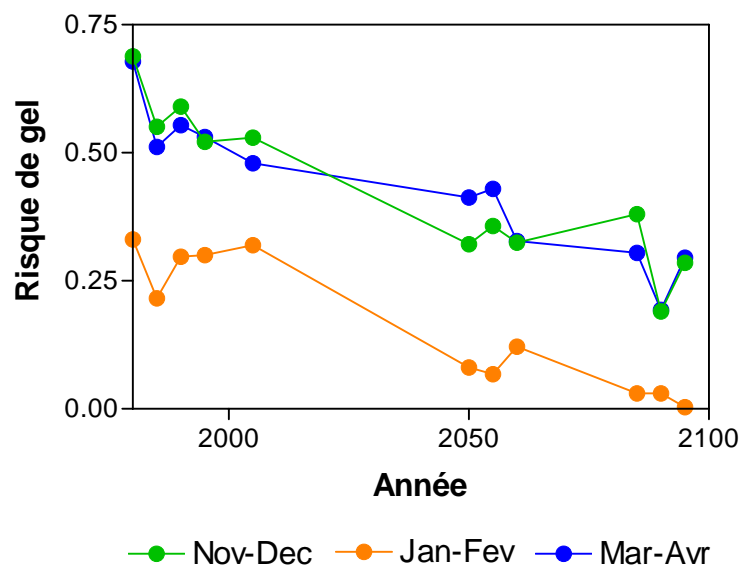


Figure 11 : Simulation CNRM-CM3 de l'évolution de 1980 à 2100 des risques de gel à trois périodes de l'année dans la région des salars.

Ce cas simple illustre ainsi la complexité des interactions entre les caractéristiques du terrain quant au déterminisme du topoclimat. Plus qu'une conséquence du réchauffement climatique, l'extension des cultures de quinoa par les agriculteurs de Palaya apparaît comme le résultat d'une colonisation progressive du territoire et d'une connaissance approfondie de leur terroir.

Les indices orotopographiques introduits dans les modèles topoclimatiques ont permis de changer d'échelle. Bien que la relation entre ces indices et le climat dépende de l'échelle considérée (Deng *et al.*, 2007 ; Gessler *et al.*, 2000), cette étape a été validée statistiquement pour le passage de mesures satellitaires à 1 km de résolution à des estimations à 100 m de résolution. La variation non expliquée par les modèles construits peut être imputable, entre autres, à la microtopographie. En effet, la précision verticale du MNT, dégradée par sa résolution, ne permet pas de rendre compte des processus agissant à une échelle plus fine, bien qu'ils puissent avoir une influence non négligeable sur les risques de gel. Le type de sol et de couvert végétal (pouvant moduler forces de friction, albédo, conduction thermique *etc*), le vent et l'humidité de l'air (de Bouet du Portal, 1993) n'ayant pas pu être pris en compte dans ces travaux ainsi que la diversité des situations orotopographiques de la région des salars engendrent certainement une grande partie de cette microvariabilité.

### *Conséquences attendues des changements climatiques*

D'après les simulations CNRM-CM3 dans la zone d'étude, les changements climatiques se sont manifestés et se manifesteront au cours du 21<sup>ème</sup> siècle par une augmentation linéaire des températures de 3 °C de 1980 à 2100, soit 0,25 °C / décennie. Vuille *et al.* (sd) ont observé à partir de 279 stations météorologiques, réparties sur toute la cordillère des Andes une augmentation de 0,10 °C / décennie depuis 1939. Dans le Pérou central, Mark & Seltzer (2005) ont trouvé une augmentation de 0,35-0,39 °C / décennie de 1951 à 1999 en se basant sur 29 stations à basse ou haute altitude. Toumi *et al.* (1999) ont relevé à partir de la station de La Quica (3462 m) un réchauffement de 0,20 °C / décennie de 1954 à 1987. Enfin, Bradley *et al.* (2006) prévoient une augmentation de la température de surface de 3 à 4 °C dans les Andes tropicales d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, selon le scénario IPCC-SRES A2. Comme le signalent Vuille *et al.* (sd), le scénario A1B utilisé dans notre travail se manifeste par 80 à 90% du réchauffement prévu par A2. Le reste de l'écart avec nos données découle probablement du gradient thermique décroissant du nord au sud du continent. Le scénario le plus modéré, mais le moins probable, en termes de rejet de CO<sub>2</sub> (IPCC-SRES B2) n'envisage que 50% du réchauffement prévu par A2.

Nos simulations sur la région des salars vont dans le sens d'une augmentation des T<sub>min</sub> et des T<sub>max</sub>, et corroborent donc l'étude de Quintana-Gomez (1997) *in* Vuille *et al.* (sd) sur les Andes boliviennes dans la période 1918 et 1990. Cependant, cet auteur trouve une augmentation des T<sub>min</sub> supérieure à celle des T<sub>max</sub> et donc une diminution de l'amplitude thermique journalière alors que, dans notre étude, cette différence est stable de janvier à avril et légèrement croissante en novembre et décembre. Cette dissimilitude peut se justifier par l'existence d'un gradient décroissant de l'augmentation observée de l'amplitude thermique journalière allant de l'Equateur au Chili (Vincent *et al.*, 2005). Le réchauffement printanier devrait inciter les agriculteurs à cultiver la quinoa plus précocement, à condition que l'évolution des ressources en eau (Argollo *et al.*, 2000) permette l'installation des cultures. En janvier et février, les risques de gel moyens auront totalement disparu en 2050 dans les zones potentiellement cultivables.

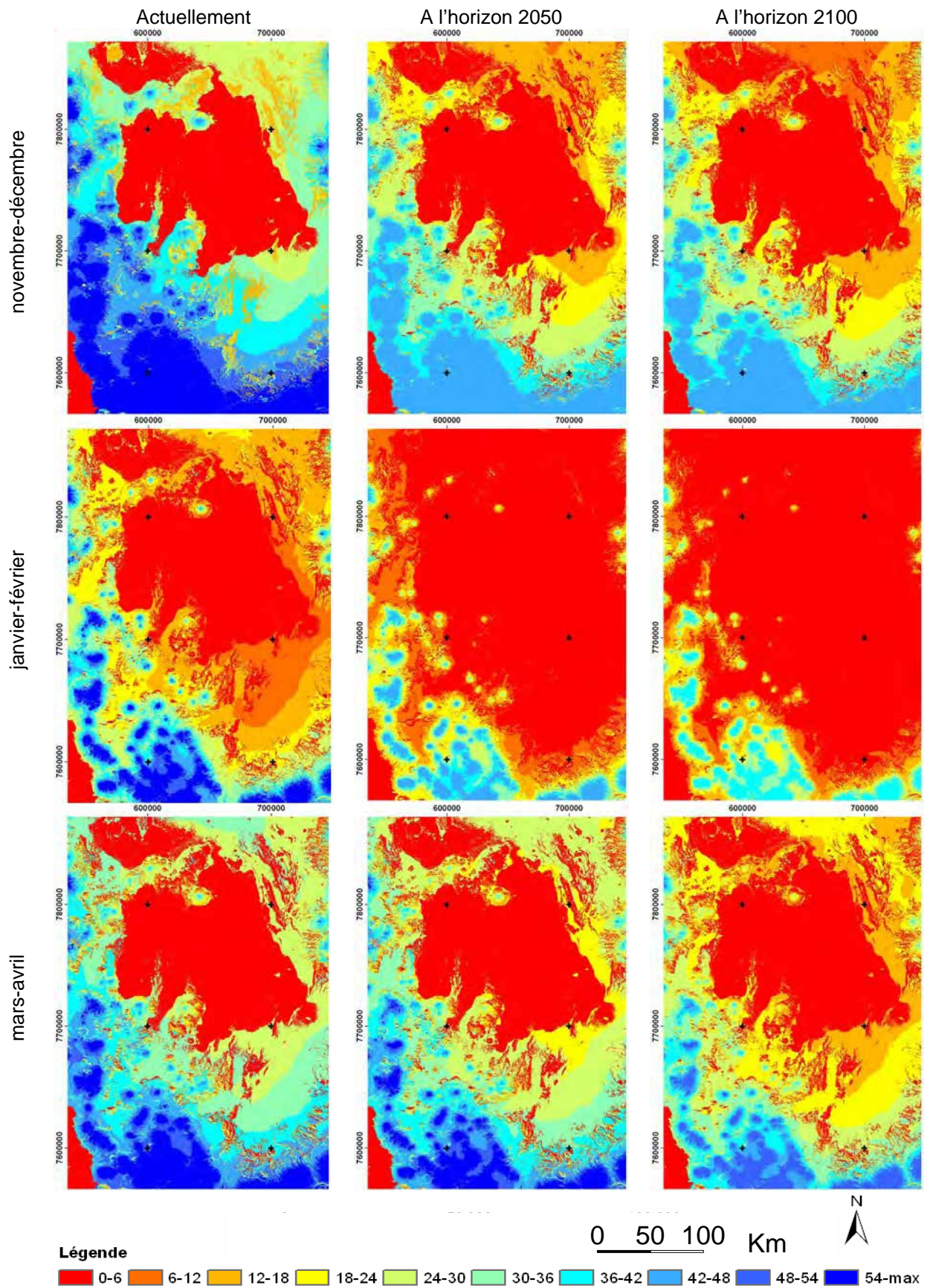


Figure 7 : Nombres de jours de gel actuels en novembre-décembre, janvier-février et mars-avril (première colonne) et simulations CNRM-CM3 correspondantes aux horizons 2050 (deuxième colonne) et 2100 (troisième colonne)

Boulangier et al. (2006), utilisant le même scénario A1B mais à échelle continentale voient la même évolution que dans notre étude, avec les mêmes ordres de grandeur de novembre à février. Cependant leurs simulations en mars et avril diffèrent, probablement parce qu'ils utilisent une combinaison de sept modèles (dont CNRM-CM3). Ils prévoient en effet une diminution des températures pendant ces deux mois.

Alors qu'en janvier et février les risques pour que  $T_{min} < 0,93$  °C deviennent infimes en 2100, en novembre, décembre, mars et avril, ces risques sont parfois encore proches de 0,25. Néanmoins, il est probable que le risque pour que  $T_{min} < -7$  °C, seuil de sensibilité au gel des phases phénologiques correspondant à ces périodes, soit extrêmement faible voire nul à l'horizon 2100.

## Conclusion

La télédétection par satellite est un outil fiable pour mesurer les forçages environnementaux auxquels sont soumis les écosystèmes, même dans les conditions extrêmes de relief et de climat de l'altiplano bolivien. Couplée à un modèle numérique de terrain (MNT), elle nous a permis de décrire et comprendre la dynamique des gelées dans une région agricole de montagne tropicale, encore mal connue. Cette compréhension nécessite de prendre en compte les échelles régionale et microclimatique (annexe 6).

A l'échelle régionale, les risques de gel sont conditionnés par la dynamique saisonnière de circulation atmosphérique régionale. Ainsi, sur l'altiplano, les périodes les plus froides se situent en début et en fin du cycle de culture de la quinoa, alors que la sensibilité de cette culture au gel est, elle, maximale en milieu de cycle. A cette composante régionale et saisonnière, s'ajoute une composante locale, plus aléatoire temporellement, qui détermine l'occurrence effective des événements de gel.

Ces gelées surviennent en effet par temps clair et calme, avec une stationnarité qui suggère que leurs variations spatiales sont dominées par des facteurs orotopographiques plus que par la circulation atmosphérique régionale. L'altitude est le principal facteur explicatif de la variation des risques de gel. Mais dans la gamme d'altitudes (3700-4200 m) où la quinoa est cultivée dans la région des salars, notre étude montre que la latitude, la proximité des salars et l'exposition peuvent moduler significativement l'effet des deux facteurs topographiques, altitude et pente, qui contrôlent le drainage adiabatique et sont couramment employés dans ce genre d'étude. Ce qui explique que les zones planes de bas de pente ne sont pas systématiquement les plus gélives. Ces interactions complexes déterminent la distribution spatiale de la vulnérabilité des cultures de quinoa aux aléas climatiques saisonniers.

Mais les variations temporelles des risques de gel s'inscrivent aussi dans la tendance plus longue du réchauffement global. Dans ce contexte, il a été démontré que le risque de gel a diminué depuis les années 1980 puisque les  $T_{min}$  ont d'ores et déjà augmenté d'environ 0,75 °C, ce qui a aussi pu favoriser la mutation agricole que connaît depuis lors la région des salars. Les scénarios futurs indiquent que les risques de gel devraient continuer à s'atténuer au cours du 21<sup>ème</sup> siècle pour disparaître à terme. En effet, en 2100, les températures minimales dépasseront de 2,25 °C leur moyenne actuelle. La durabilité écologique de la culture de la quinoa en serait renforcée, à condition que les changements globaux n'accroissent pas les risques



d'érosion édaphique, de sécheresse, d'attaques de ravageurs déjà présents ou, à échelle continentale, une modification de la circulation des masses d'air.

L'archivage progressif de séries de températures satellitaires plus longues devrait permettre de mieux caractériser le risque effectif de gel pour la quinoa. La compréhension de la distribution spatiale et temporelle des risques écologiques à l'échelle du paysage est essentielle pour évaluer les potentialités agricoles d'une région. Dans les régions andines, les contraintes environnementales majeures comme la température ont été analysées aux échelles régionale et continentale principalement. Il est maintenant primordial de développer la modélisation des processus écologiques présents et futurs à l'échelle du paysage puisque c'est typiquement à ce niveau que les décisions de mise en valeur des ressources naturelles et cultivées sont prises.



## Remerciements

J'adresse tous mes remerciements aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont ainsi contribué à l'élaboration de ce travail.

Un merci particulier à Thierry Winkel (IRD), coordinateur du projet EQUICO, pour le soutien, la disponibilité et la pédagogie dont il a fait preuve, à Jean-Pierre Ratte (CEFE-CNRS), ingénieur spécialiste des SIG et données spatialisées, pour sa contribution technique décisive dans l'élaboration de ce travail et à Serge Rambal (CEFE-CNRS), directeur du département Fonctionnement des Ecosystèmes, pour ses recommandations théoriques toujours pertinentes. Leur complémentarité a rendu cette expérience de stage extrêmement profitable.

« Gracias » également à Richard Joffre (CEFE-CNRS), directeur de recherche en mission en Bolivie, et Jean-Joinville Vacher, représentant de l'IRD en Bolivie, pour leur accueil chaleureux et leurs conseils avisés ainsi qu'à Jean-Rémi Duprat, en stage au CEFE-CNRS, pour sa coopération.

Je souhaite aussi exprimer ma gratitude à David Salas-Mélia (CNRM-Météo France) pour avoir mis à notre disposition les données sud-boliviennes du performant modèle CNRM-CM3.

Enfin, ce travail de stage a bénéficié du concours financier du projet ANR EQUICO (ANR-06-PADD-0011) et du CEFE-CNRS. Qu'ils trouvent ici mes remerciements pour leur accueil.



## Références bibliographiques

- Argollo J., Mourguiart P. 2000. Late Quaternary climate history of the Bolivian Altiplano. *Quaternary International* 72 37-51.
- Bois J.F., Winkel T., Lhomme J.P., Raffaillac J.P., Rocheteau A. 2006. Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: Effects on germination, phenology, growth and freezing. *European Journal of Agronomy* 25: 299-308.
- Benavides R., Montes F., Rubio A., Osoro K. 2007. Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* 146: 173-188.
- Blennow K., Persson P. 1998. Modelling local-scale frost variations using mobile temperature measurements with a GIS. *Agricultural and Forest Meteorology* 89: 59-71.
- Blennow K., Lindkvist L. 2000. Models of low temperature and high irradiance and their application to explaining the risk of seedling mortality. *Forest Ecology and Management* 135: 289-301.
- Boulanger J.-P., Martinez F., Segura E.C. 2006. Projection of future climate change conditions using IPCC simulations, neural networks and Bayesian statistics. Part 1: Temperature mean state and seasonal cycle in South America. *Climate Dynamics* 27: 233-259.
- Bradley R.S., Vuille M., Diaz H.F., Vergara W. 2006. Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science* 312: 1755-1756.
- Catacora C., Canahua A. 1992. Selección de genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) resistentes a heladas, y perspectivas de producción en camellones. In: *Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos* (Eds. Morales D., Vacher J.J.). ORSTOM, La Paz, Bolivia, pp. 53-56.
- Chuanyan Z., Zhongren N., Guodong C. 2005. Methods for modelling of temporal and spatial distribution of air temperature at landscape scale in the southern Qilian mountains, China. *Ecological Modelling* 189: 209-220.
- Daly C., Helmer E.H., Quinones M. 2003. Mapping the climate of Puerto Rico, Vieques and Culebra. *International Journal of Climatology* 23: 1359-1381.
- Daly C. 2006. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International journal of climatology* 26 : 707-721.
- De Bouet du Portal D. 1993. Etude des gelées sur l'altiplano bolivien. *Mémoire de fin d'études, ENSA, Montpellier, France*.
- Deng Y., Chen X., Chuvieco E., Warner T., Wilson J.P. 2007. Multi-scale linkages between topographic attributes and vegetation indices in a mountainous landscape. *Remote Sensing of Environment* 111: 122-134.



- Durand D. 1978. Comment déterminer une situation gélive? In : *Acte des journées d'information « Lutte contre les gelées »*, Angers, février 1978. Editions INVuFLeC, Paris, France.
- François C., Bosseno R., Vacher J.J., Seguin B. 1999. Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano. *Agricultural and Forest Meteorology* 95: 113-137.
- Frère M., Rijks J.Q., Rea J. 1978. Estudio agroclimatológico de la zona andina. FAO-OMM-UNESCO, Genève, Suisse, 297 p.
- Geerts S., Raes D., Garcia M., Del Castillo C., Buytaert W. 2006. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: a case study for quinoa. *Agricultural and Forest Meteorology* 139: 399-412.
- Gessler P.E., Chadwick O.A., Chamran F., Althouse L., Holmes K. 2000. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. *Soil Science Society of America* 64: 2046-2056.
- Izquierdo Fernández J.I., Mujica A., Jacobsen S.E., Marathée J.P., Morón C. 2001. Cultivos andinos. Versión 1.0. CD-Rom. Santiago, Chile, FAO.
- Jacobsen S.E., Monteros C., Christiansen J.L., Bravo L.A., Corcuera L.J., Mujica A. 2005. Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Agronomy* 22: 131-139.
- Kalthoff N., Fiebig-Wittmaack M., Meiner C., Kohler M., Uriarte M., Bischoff-Gau I., Gonzales E. 2006. The energy balance, evapo-transpiration and nocturnal dew deposition of an arid valley in the Andes. *Journal of Arid Environments* 65: 420-443.
- Lebonvallet S. 2008. Implantation du quinoa et simulation de sa culture sur l'Altiplano bolivien. *Thèse de Doctorat. AgroParisTech, Paris, 244 p.*
- Le Tacon P. 1989. Manifestation des risques climatiques à l'échelle de l'exploitation agricole - Conséquences sur les pratiques paysannes - Cas de l'Altiplano bolivien. *Thèse d'ingénieur ENSSAA - CNEARC, Montpellier, France, 164 p.*
- Le Tacon P. 1991. Les risques de gelée sur l'altiplano bolivien. *Rapport d'étape de formation doctorale ENSSAA- CNEARC, Montpellier, France.*
- Le Tacon P., Allriol G., Vacher J.J., Bosseno R., Eldin M., Imaña E., Maldonado R. 1992. Los riesgos de helada para la agricultura en el altiplano boliviano. *Symposium / Workshop on practical applications of agrometeorology to plant protection. OMM, Asunción, Paraguay, 1-10 april 1992.*
- Li A., Wang A., Liang S., Zhou W. 2006. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS: a case study in the upper reaches of Minjiang River, China. *Ecological Modelling* 192: 175-187.



- Lindkvist L., Gustavsson T., Bogren J. 2000. A frost assessment method for mountainous areas. *Agricultural and Forest Meteorology* 102: 51-67.
- Lookingbill T.R., Urban D.L. 2003. Spatial estimation of air temperature differences for landscape-scale studies in montane environments. *Agricultural and Forest Meteorology* 114: 141-151.
- MacMillan R.A., Jones R.K., McNabb D.H. 2004. Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modelling using digital elevation models (DEMs). *Computers, Environment and Urban Systems* 28, 175-200.
- Mark B.G., Seltzer G.O. 2005. Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews* 24: 2265-2280.
- Moore I.D., Gessler P.E., Nielsen G.A., Peterson G.A. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America* 57: 443-452.
- Moulin S. 1994. Zonage des gelées à partir d'imagerie satellitaire de type NOAA-AVHRR, application aux cultures de l'Altiplano bolivien. *Mémoire de fin d'études. ISTOM, Cergy, France.*
- Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., De Vries H., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grubler A., Jung T., Kram T., Rovere E.L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Papper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H.H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z. 2000. Special Report on Emissions Scenarios. *Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.*
- Ninyerola M., Pons X., Roure J.M. 2007. Objective air temperature mapping for the Iberian Peninsula using spatial interpolation and GIS. *International Journal of Climatology* 27: 1231-1242.
- Oettli P., Camberlin P. 2005. Influence of topography on monthly rainfall distribution over East Africa. *Climate Research* 28: 199-212.
- Oke T.R. 1987. *Boundary Layer Climates. Routledge, London, UK.*
- Perrin de Brichambaut C. 1963. Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels. *Gauthier-Villard, Paris, France, 300 p.*
- Quintana-Gomez R.A. 1997. Changes in maximum and minimum temperatures at high elevation stations in the central Andes of South America. *Proceedings of the American Meteorological Society Meeting on Climate Variations. pp. 112-113.*
- Quintana-Gomez, R.A. 2000. Trends of maximum and minimum temperatures in Ecuador and homogeneity evaluation during 1961-90. *Preprints 6th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Santiago, Chile: 292-293.*



Ronchail J. 1989. Advections polaires en Bolivie : mise en évidence et caractérisation des effets climatiques. *Hydrologie Continentale* 4: 49-56.

Ruales J., Nair B. M. 1993. Saponins, phytic acid, tannins and protease inhibitors in quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) seeds. *Food chemistry* 48: 137-143

Rundel P.W. 1994. Tropical alpine ecology : progress and priorities. In : *Tropical alpine environments: plant form and function.* (Eds. Rundel P.W., Smith A.P., Meinzer F.C.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 355-363.

Sakai A., Larcher W. 1987. Frost survival of plants: responses and adaptation to freezing stress. *Springer Verlag, Berlin, Germany.*

Salas-Mélia D., Chauvin F., Déqué M., Douville H., Guérémy J.F., Marquet P., Planton S., Royer J.F., Tyteca S. 2005. Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model. *Manuscrit soumis à Climate Dynamics, septembre 2005.*

Seguin B. 1975. Caractérisation des inversions nocturnes lors des gelées de printemps dans un verger de la moyenne vallée du Rhône. *Note technique M/75/2, INRA, France.*

Taylor W.G. 1996. Statistical relationships between topography and precipitation in a mountainous area. *Northwest Science* 70: 164-178.

Toumi R., Hartell N., Bignell K. 1999. Mountain station pressure as an indicator of climate change. *Geophysical Research Letters* 26: 1751-1754.

Vincent L.A., Peterson T.C., Barros V.R., Marino M.B., Rusticucci M., Carrasco G., Ramirez E., Alves L.M., Ambrizzi T., Berlato M.A., Grimm A.M., Marengo J.A., Molion L., Moncunill D.F., Rebello E., Anunciacao Y.M.T., Quintana J., Santos J.L., Baez J., Coronel G., Garcia J., Trebejo I., Bidegain M., Haylock M.R., Karoly D. 2005. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960- 2000. *Journal of Climate* 18: 5011-5023.

Vuille M., Bradley R.S. 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters*, 27: 3883-3888.

Vuille M., Bradley R.S., Werner M., Keimig F. 2003c. 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. *Climatic Change*, 59: 75-99.

Vuille M., Francou B., Wagnon P., Juen I., Kaser G., Mark B.G., Bradley R.S., sd. Climate Change and tropical Andean glaciers : Past, present and future. *Manuscrit soumis à Earth Science Review, mars 2008.*

Wan Z., Li Z.L. 1997. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 980-996.

Willmott C. J., Johnson M.L. 2005. Resolution errors associated with gridded precipitation fields. *International Journal of Climatology* 25: 1957-1963.



## Annexe 1 : Fondements théoriques de la température radiative de surface

La matière émet et reçoit en permanence une radiation électromagnétique, énergie se propageant dans l'espace, interagissant avec la matière. Cette énergie est constituée d'ondes électromagnétiques. Le spectre électromagnétique, représentation du rayonnement selon une longueur d'onde  $\lambda$ , s'étale dans tout le domaine où  $\lambda$  a physiquement un sens. La longueur d'onde confère au rayonnement des propriétés spécifiques, à l'origine de la division du spectre en grandes unités (Fig.1').

L'intensité énergétique ( $L_o$ ) émise par unité de surface, appelée aussi radiance, est régie par la loi de Planck ou loi du corps noir :

$$L_o(\lambda(T)) = 2hc^2 / (\lambda^5 \cdot (e^{hc/\lambda kT} - 1)) \text{ (en } W \text{ m}^{-1} \mu\text{m)}$$

- h = constante de Plank ( $6,6256 \cdot 10^{34} \text{ J s}$ )
- c = célérité de la lumière ( $2,98 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ )
- k = constante de Boltzmann ( $1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J s}^{-1}$ )
- T = température absolue du corps noir ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $\lambda$  = longueur d'onde de la radiation ( $\mu\text{m}$ )

On distingue trois sources de rayonnement mises en jeu dans le processus de gelée radiative (Fig.2').

On désigne par rayonnement global ( $R_g$ ) le flux énergétique de rayonnement émis par le soleil par unité de surface de sol. Il est composé d'un rayonnement direct et d'un rayonnement diffusé par l'atmosphère, les nuages et les aérosols (Perrin de Brichambaut, 1963). C'est l'élément moteur des conditions météorologiques et climatiques de la Terre.

Le rayonnement atmosphérique ( $R_a$ ) est essentiellement dû aux molécules de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$  et vapeur d'eau constituant l'atmosphère. Etant donné les températures régnant dans les couches atmosphériques, ces gaz émettent un rayonnement dans l'infrarouge thermique.

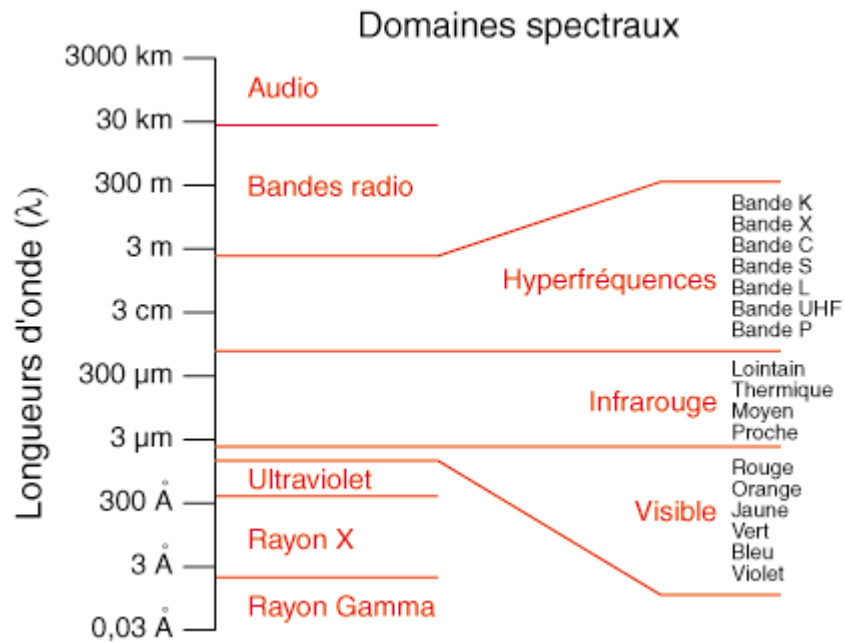
Le rayonnement terrestre ( $R_t$ ), ou rayonnement propre, est le rayonnement émis par le sol sous forme d'infrarouges thermiques.

Les gaz de l'atmosphère ont un spectre d'émission similaire à leur spectre d'absorption si bien qu'en présence de nuages, l'essentiel du rayonnement terrestre est réfléchi par ces derniers.

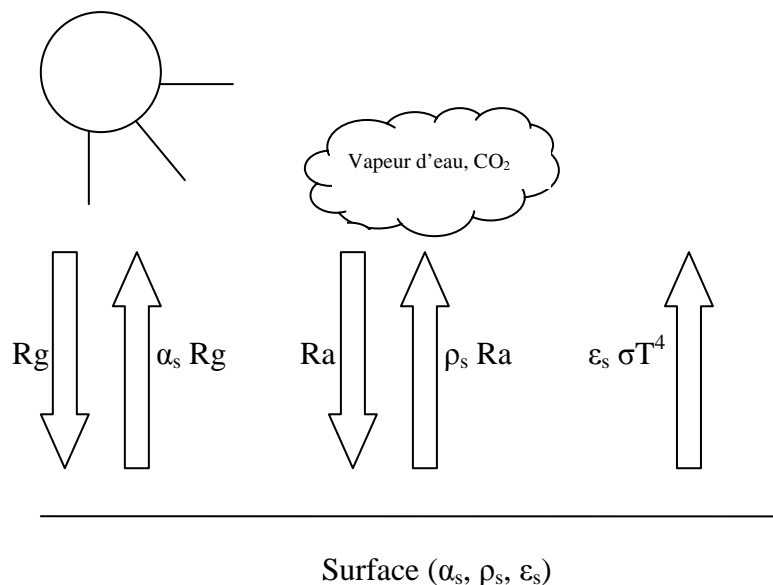
La résultante au sol de ces échanges est le rayonnement net ( $R_n$ ), positif le jour et négatif la nuit (car  $R_g = 0 \text{ W m}^{-2}$ ). La température de la surface dépend de ce  $R_n$  :

$$R_n = (1 - \alpha_s) \cdot R_g + (1 - \rho_s) \cdot R_a - \epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

- $R_n$  = rayonnement net ( $\text{W m}^{-2}$ )
- $\alpha_s$  = albédo de la surface
- $R_g$  = rayonnement solaire incident global ( $\text{W m}^{-2}$ )
- $\rho_s$  = coefficient de réflexion thermique de la surface
- $R_a$  = rayonnement thermique incident, émis par l'atmosphère ( $\text{W m}^{-2}$ )
- $\epsilon_s$  = émissivité de la surface
- $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ )
- $T_s$  = température radiative de surface ( $^{\circ}\text{K}$ )

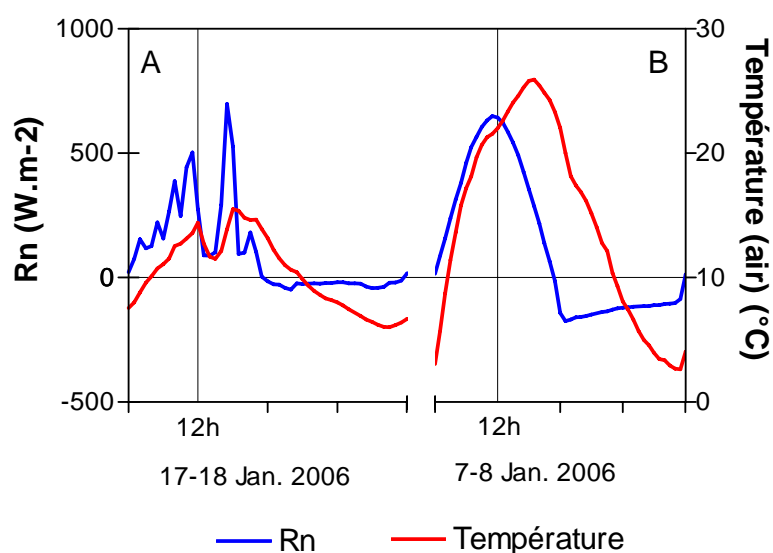


**Figure 1'** : Les principaux domaines du spectre électromagnétique et leurs longueurs d'onde associées (source : <http://tpouchin.club.fr/chapitre1/rem.htm>)

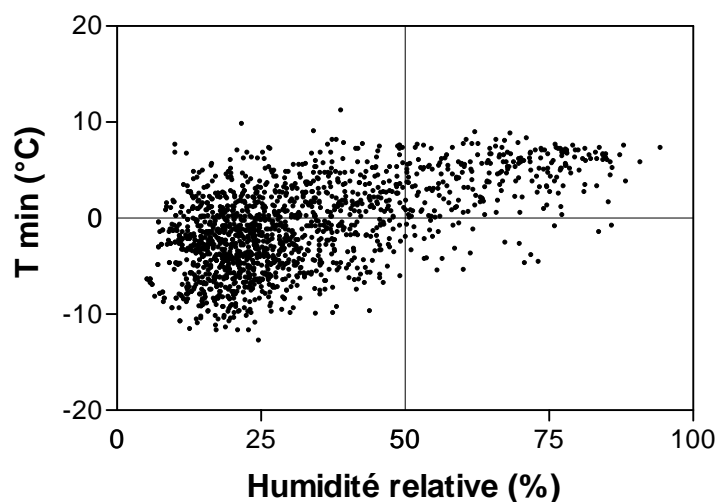


**Figure 2'**: Les différentes composantes du rayonnement net.  $R_g$  est le rayonnement solaire global,  $\alpha_s R_g$  est le rayonnement solaire réfléchi par la surface,  $R_a$  est le rayonnement atmosphérique incident,  $\rho_s R_a$  est le rayonnement atmosphérique réfléchi par la surface et  $\epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4$  est le rayonnement émis par la surface à la température  $T_s$ . Adapté de Jacob (1999)

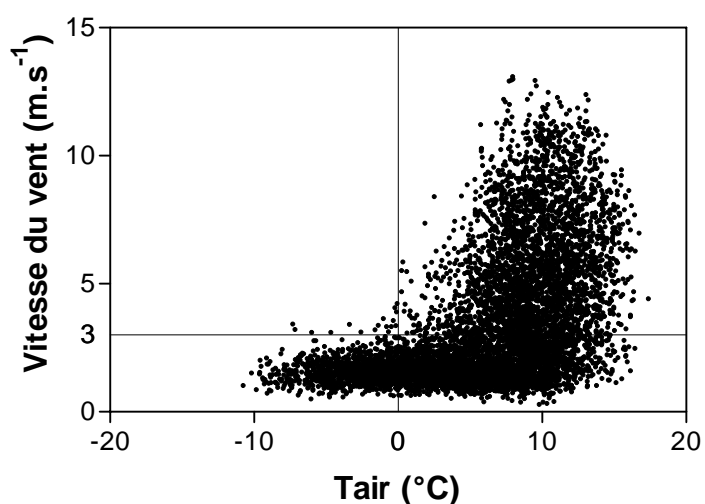
La nuit, la surface du sol et la végétation compensent le déficit radiatif de l'air en libérant par conduction d'infrarouge, proportionnellement à la puissance quatrième de la température absolue de la surface, l'énergie accumulée le jour. Il en résulte une déperdition d'énergie importante ( $R_n$  très petit) à l'origine des gelées radiatives. Le bilan radiatif à la surface du sol peut être modifié par les conditions météorologiques (nébulosité, vent, humidité de l'air). Par temps couvert notamment, le  $R_t$  sera en partie réémis par l'atmosphère vers le sol. La perte de chaleur au niveau du sol sera donc moins importante que par temps clair (Fig. 3'). Le risque de gel également. Le vent joue également un rôle important de brassage des masses d'air, empêchant ainsi la stagnation d'une couche d'air froid au niveau du sol (Fig.4'). L'humidité relative de l'air est aussi prépondérante (Fig.5'). En effet l'humidité correspond à la pression partielle de la vapeur d'eau. Or, d'après la loi des gaz parfaits, la température dépend de la pression partielle de la vapeur d'eau et inversement.



**Figure 3' : Evolutions de  $R_n$  and  $T_{air}$  mesurés à la station d'Irpani par temps nuageux (A) et par temps clair (B).** Du rayonnement net ( $R_n$ ) dépend la température de surface ( $T_s$ ). Quand  $R_n$  est négatif,  $T_s$  diminue (et inversement) et ce de manière proportionnelle. De jour comme de nuit,  $R_n$  est affecté par le passage des nuages. La nuit par temps couvert (A),  $R_n$  est plus grand que par temps clair (B), et  $T_s$  est donc plus grande par temps couvert que par temps clair.



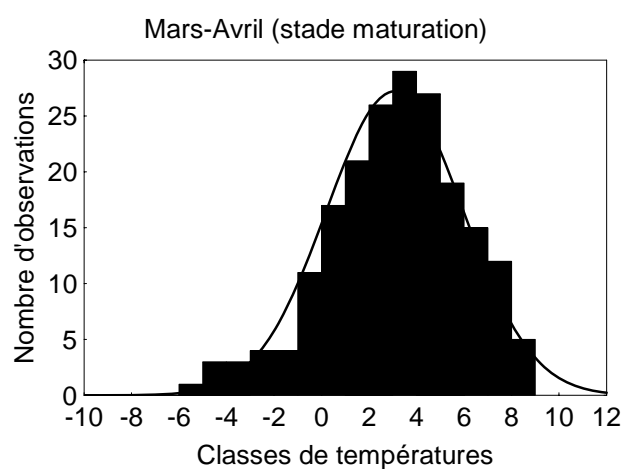
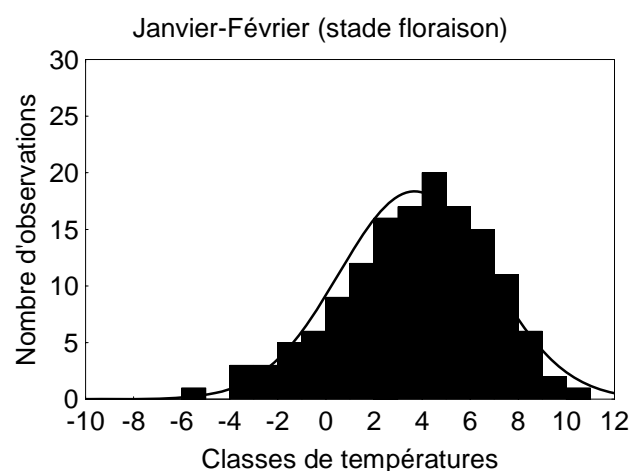
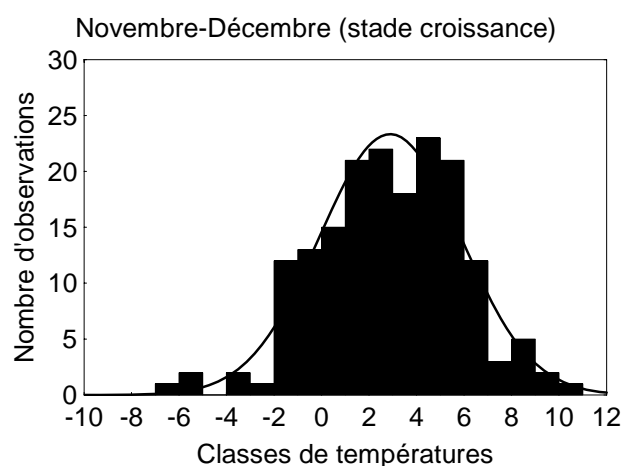
**Figure 5'** : Tmin en fonction de l'humidité relative minimale à Salinas (n=1609). Les jours les plus froids sont aussi les plus secs (moins de 50% d'humidité).



**Figure 4'** : Vitesse du vent en fonction des Tair nocturnes à Jirira (n=7593). Chaque point correspond à un couple de mesures de Tair et de vitesse du vent effectuées toutes les demi-heures entre 21h00 et 6h00. A Jirira, entre novembre 2006 et décembre 2007, les épisodes de gelée nocturne n'ont eu lieu que lorsque la vitesse du vent était inférieure à  $3 \text{ m s}^{-1}$  ( $10,8 \text{ km h}^{-1}$ ). Ces gelées sont donc radiatives et non pas advectives.

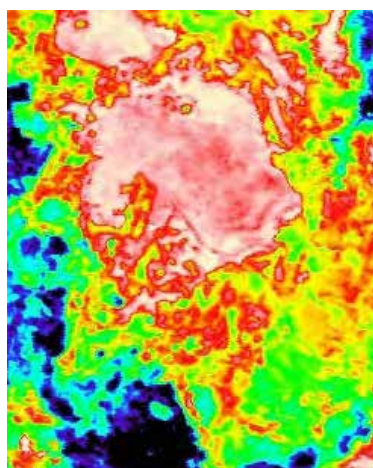
## Annexe 2 : Distribution de probabilité des Ts durant les trois phases phénologiques de la quinoa à Salinas

La distribution théorique des Ts a été représentée par une courbe. La p-value du test de Shapiro-Wilk est de 0,46 en novembre-décembre et de 0,16 en janvier-février. Par contre, en mars-avril, ce test n'est pas significatif au seuil de 5% contrairement au test de Kolmogorov-Smirnov dont la p-value est 0,01. *NB* : les hypothèses nulles des deux tests sont différentes.

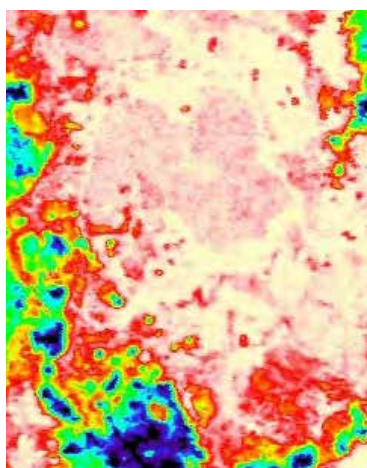




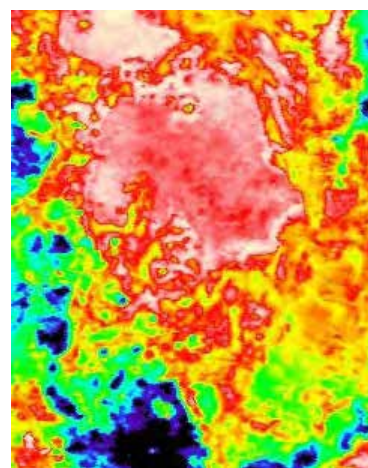
**Annexe 3 : Distribution spatiale des risques de gel calculés à partir de la série d'images MODIS pour les trois phases phénologiques de la quinoa (résolution kilométrique)**



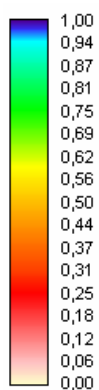
novembre-décembre



janvier-février



mars-avril

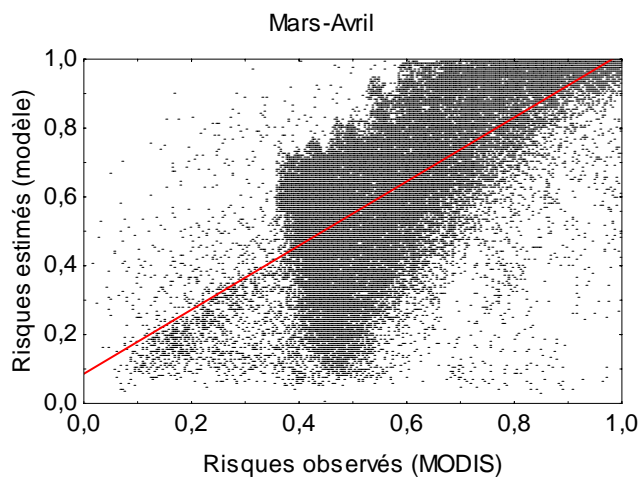
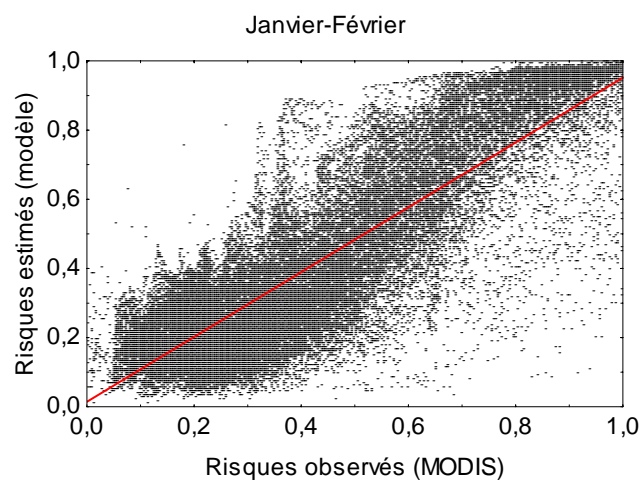
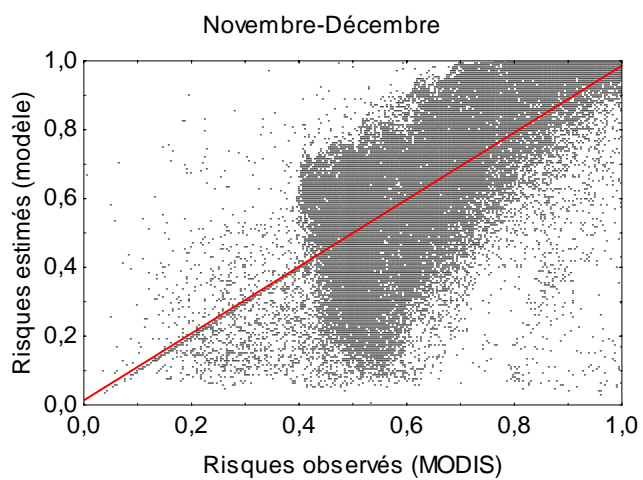


0 50 100 Km



**Annexe 4 : Correlations entre les risques de gel estimés et ceux observés durant les trois phases phénologiques de la quinoa**

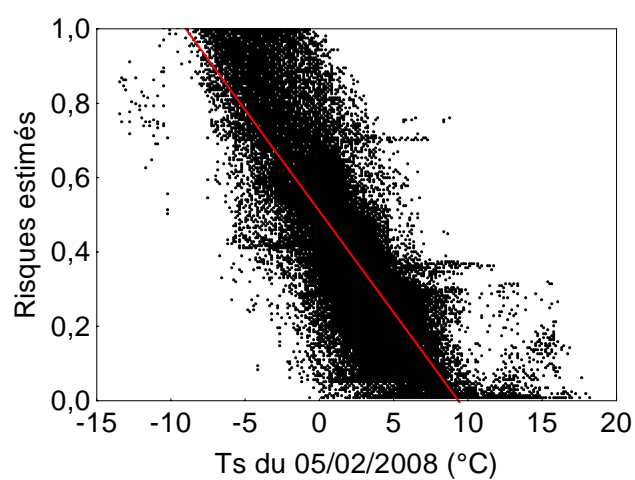
Leur droite de régression a été représentée en rouge (n = 54001).





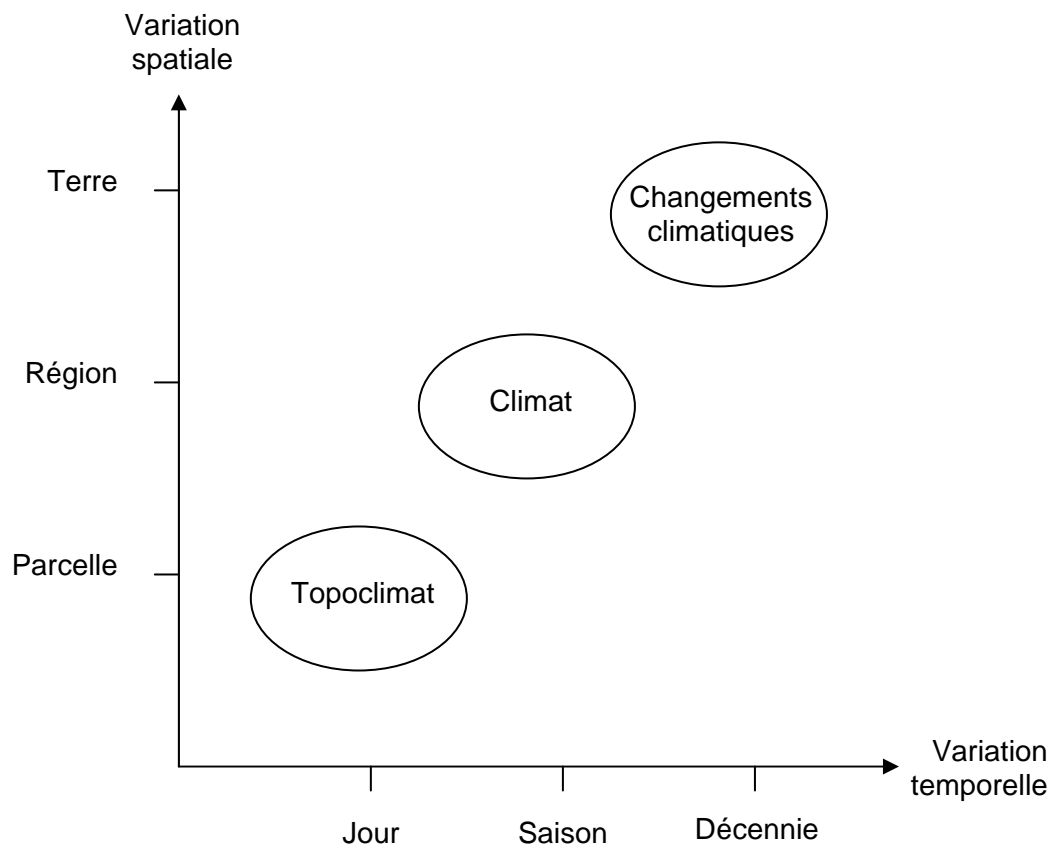
**Annexe 5 : Régression linéaire entre les risques de gel estimés en janvier-février et les Ts mesurées lors d'une nuit froide : le 5 février 2008**

La droite de régression est représentée en rouge (n = 54001).





**Annexe 6 : Représentation schématique des échelles de temps et d'espace qui agissent sur les risques de gel**





## Risques de gel et scénarios climatiques dans l'altiplano sud de Bolivie : spatialisation de la vulnérabilité écologique des cultures de quinoa

### Résumé

Le succès commercial international de la quinoa amène les agriculteurs de la région des salars, au sud des hauts plateaux boliviens, à cultiver des zones de plaine soumises à d'importants risques de gelée radiative nocturne. Bien que la quinoa soit adaptée aux conditions extrêmes de l'altiplano, sa sensibilité au froid dépend de sa phénologie et le risque de gel n'est jamais nul. Les trois phases phénologiques de la quinoa (croissance végétative, floraison et maturation) sont en correspondance avec les dynamiques atmosphériques saisonnières contrastées déterminant les risques de gel. S'ils varient avec le temps, ces risques dépendent aussi fortement du topoclimat. Le système de télédétection satellitaire MODIS enregistre les températures radiatives de surface et la présence de nuages quotidiennement et en tout point de cette région avec une résolution kilométrique. Conjugué à un système d'information géographique et aux relevés de 3 stations météorologiques *in situ*, MODIS a été validé pour spatialiser les risques de gel, abordés par un calcul probabiliste. Pour chacune des trois phases phénologiques de la quinoa, un modèle simple d'estimation des risques a été construit à partir de leur relation avec plusieurs indices orotopographiques pour comprendre les processus contrôlant les gelées et cartographier les risques à une résolution spatiale de 100 m, plus proche de celle de ces processus eux-mêmes et des interventions des agriculteurs. Dans cette région de montagne (3650-5900 m), le climat local est largement déterminé par l'altitude mais aussi par la latitude, la proximité des salars, la pente et son exposition. Un indice quantifiant le phénomène de drainage adiabatique a également été ajouté. Les modèles ont été calibrés par régression multiple avec un échantillon de pixels homogènes en termes d'indices orotopographiques puis validés statistiquement. Cette approche quantitative a mis en évidence l'action relative de chaque facteur orotopographique sur le climat et leurs interactions mutuelles. Enfin, le modèle de circulation globale CNRM-CM3, simulant le scénario climatique IPCC-SRES A1B, a été utilisé pour montrer que l'altiplano sera particulièrement affecté par le réchauffement global avec une augmentation moyenne de 3 °C entre 1980 et 2100 pendant toute la saison de culture. Ce réchauffement se manifestera par une diminution considérable voire totale des risques de gel à l'horizon 2100.

**Mots-clés** : changement d'échelle ; paysage ; télédétection ; température radiative de surface ; topoclimat

## Frost risks and climatic scenarios in southern Bolivian altiplano : spatialisation of quinoa crop ecological vulnerability

### Abstract

The success of quinoa in the international market leads the farmers of the salar region (southern Bolivian highlands) to cultivate in flat areas with important night radiative frost risks. Though quinoa is adapted to the extreme conditions of the Andean highlands, its frost sensitivity depends on its phenology and frost risk is never nil. The three major quinoa phenological phases (vegetative growth, flowering and maturity) are associated with contrasted seasonal atmospheric dynamics controlling frost risk. Though varying with time, these risks also depend highly on topoclimate. MODIS satellite remotely senses surface radiative temperature and cloud cover daily and everywhere in the study area with a 1 km resolution. Combined with a geographical information system and with 3 meteorological station datasets, MODIS was validated and used to map frost risks, based on a statistical approach. For each of the three quinoa phenological phases, a simple estimation model of frost risks was built from their relation with orotopographical descriptors in order to understand the processes controlling frost events and to downscale the resolution until 100 m, which is closer to the scales of the physical processes themselves and of the farmer crop practices too. In this mountain area (3650-5900 m) local climate depends highly on elevation but also on latitude, salar distance, slope and aspect. A compound topographical index was also added to quantify the adiabatic drainage. Models were calibrated by multiple regressions with a sample of topographically homogeneous pixels, before being statistically validated. This approach permitted to highlight the relative effect of each orotopographical factor on climate and their interrelations. Finally, the CNRM-CM3 global circulation model, simulating the IPCC-SRES A1B climatic scenario, was used to show that, from 1980 to 2100, the Andean highlands will be particularly affected by the global warming with a 3 °C average increase during the whole crop season. This warming will result in a considerable reduction, and even total disappearance, of frost risks by 2100.

**Key words** : downscaling ; landscape ; remote sensing ; surface radiative temperature ; topoclimate