

# Zones d'altitude : la transformation rapide des milieux andins



© IRD/P. Wagnon

Vue du Chimborazo  
depuis le volcan Altar.  
Équateur.

**L**es régions tropicales d'altitude sont parmi celles où l'impact du changement climatique est le plus marqué. Le recul des glaciers tropicaux y est spectaculaire, en particulier dans les Andes, cordillère qui concentre à elle seule 99 % des glaciers tropicaux. La surface de ces glaciers a diminué de 30 à 50 % en une trentaine d'années. Or, la fonte des glaces a de nombreuses conséquences sur l'hydrologie des bassins versants, et donc sur l'approvisionnement en eau et sur la dynamique des milieux d'altitude. Et les changements à venir s'annoncent tout aussi importants, alors que les projections climatiques prévoient un réchauffement exacerbé dans les écosystèmes tropicaux de haute montagne, qui pourrait s'élever à + 3 °C d'ici la fin du siècle.

Depuis une vingtaine d'années, l'IRD conduit des recherches sur les glaciers et les milieux d'altitude dans les Andes. Glaciologues, climatologues, hydrologues, écologues, agronomes, modélisateurs développent ainsi une approche transdisciplinaire afin de mieux comprendre les mécanismes de la fonte des glaces, son rôle dans l'hydrologie des bassins versants, la sensibilité de la biodiversité à ces changements, etc.

Les Andes constituent aussi un espace privilégié pour observer des tendances fines, comme l'évolution de la biodiversité liée au changement climatique, car les écosystèmes

d'altitude restent encore relativement préservés, comparés à d'autres milieux (les zones côtières, par exemple) où les nombreuses pressions anthropiques rendent les facteurs climatiques plus difficiles à isoler.

## Retrait glaciaire et ressources en eau

Les glaciers tropicaux sont très sensibles au réchauffement global. Depuis les années 1970, tandis que les précipitations ont peu évolué, la température atmosphérique moyenne dans les Andes tropicales a augmenté de 0,7 °C. Si, à cette altitude, la température n'est pas directement responsable de la fonte, elle agit sur la nature des précipitations, solides ou liquides, et donc sur le maintien du manteau neigeux. Ce

Encadré 29

### La variation annuelle de masse du glacier, un bon indicateur du climat

© IRD/P. Blanchon



Le glacier Zongo au sommet du Huayna Potosi (Bolivie) a beaucoup reculé lors des dernières décennies.

Les données climatiques mesurées directement par les stations météorologiques sont très peu nombreuses dans les régions de haute montagne.

L'IRD travaille ainsi à renforcer les observatoires du climat dans les différents pays andins (cf. partie 1, p. 43).

Parmi les observations importantes, un bon indicateur du climat est la variation annuelle de masse du glacier, qui représente le bilan des apports et des pertes sur une année.

Les chutes de neige constituent le principal apport de masse, alors que les pertes sont surtout dues à la fusion de la glace ou de la neige en surface. La mesure du bilan annuel de masse rend ainsi directement compte des conditions météorologiques qui régissent les processus d'accumulation et d'ablation de la neige et de la glace à leur surface.

Des chercheurs du LTHE ont mené à bien pour la première fois plusieurs campagnes de mesure de flux turbulent sur le glacier du Zongo en Bolivie. Ces recherches ont permis de mieux caractériser la particularité des glaciers tropicaux. En effet, sous les tropiques, l'ablation a lieu toute l'année, tandis que l'accumulation se fait lors de la saison humide. Le changement climatique observé depuis plusieurs décennies tend à élever la limite pluie/neige, ce qui induit plus d'ablation et moins d'accumulation. Ces suivis des bilans de masse permettent une meilleure compréhension de la relation climat/glacier. Ils alimentent également les comparaisons des processus de fonte et d'accumulation entre des régions variées (latitudes polaires, tempérées ou tropicales), qui permettent de mettre en évidence des différences marquées liées au contexte climatique.

dernier contribue à réfléchir la plus grande partie de l'énergie solaire. Sans lui, la fonte du glacier augmente de façon considérable. Or, cette situation où les glaciers sont dénudés a eu tendance à devenir plus fréquente ces dernières décennies.

Les recherches menées par l'IRD et ses partenaires ont montré une accélération de la fonte des glaciers andins au cours des quarante dernières années. Les glaciers de Colombie, d'Équateur, du Pérou et de Bolivie ont vu leur surface réduite de 30 à 50 % depuis la fin des années 1970. Les glaciers de petite taille (inférieure à 1 km<sup>2</sup>) situés à moins de 5 400 m d'altitude sont les plus touchés, dans la mesure où leur zone d'accumulation (là où la neige se stocke puis se transforme en glace) est réduite. Si les hausses de température prévues par les modèles climatiques d'ici la fin du siècle se confirment, la plupart des glaciers de cette région des Andes, les grands comme les petits, pourraient disparaître, comme l'a déjà fait en 2010 le glacier de Chacaltaya, au-dessus de la ville de La Paz en Bolivie.

### **Les glaciers, des réserves d'eau pour les périodes sèches**

Le rôle des glaciers dans le fonctionnement hydrologique des bassins versants de montagne est très variable selon les régions. Il est souvent minimal dans les zones tempérées comme les Alpes, où le manteau neigeux hivernal et les précipitations sont importantes. Cependant, dans les régions tropicales où la saisonnalité des précipitations est marquée par une saison sèche de plusieurs mois et où aucun manteau neigeux ne peut s'établir, les glaciers jouent un rôle significatif dans l'écoulement des rivières situées à l'aval.

Les glaciers andins sont donc d'importants régulateurs des cycles d'eau saisonniers. Ils jouent le rôle de réservoirs d'eau gelée qui fondent et s'écoulent pendant les périodes de sécheresse et alimentent les cours d'eau en aval. La contribution des glaciers au régime hydrologique peut atteindre 25 à 30 % pendant la saison sèche dans certains bassins versants qui ont des taux d'englacement de l'ordre de 20 %. Dans les régions arides, comme au Pérou ou en Bolivie, l'apport des glaciers à l'irrigation, à la génération hydro-électrique et à l'alimentation en eau des populations locales peut être très significatif : ainsi 15 % de l'eau consommée à La Paz vient des glaciers, un chiffre qui monte à 30 % en saison sèche.

### **Mieux comprendre l'impact du retrait glaciaire sur la disponibilité en eau**

Les scénarios du changement climatique prédisent pour les prochaines décennies un réchauffement exacerbé des températures dans les écosystèmes tropicaux de haute

Recul du glacier Zongo  
sur la montagne  
Huayna Potosi (Bolivie).

L'accélération de la fonte  
des glaces augmente  
la quantité d'eau  
disponible en aval.

Mais la tendance  
s'inversera lorsque  
les réservoirs glaciaires  
auront diminué.

montagne. Si la tendance se poursuit, une accélération de la fonte et une augmentation du ruissellement dans les sous-bassins d'altitude se produiront dans un premier temps, augmentant d'autant la quantité d'eau disponible en aval. Mais ensuite, lorsque le réservoir glaciaire aura diminué, les contributions de l'eau de fonte seront inférieures à celles observées aujourd'hui. Les sécheresses pourraient ainsi être plus graves qu'à l'heure actuelle, alors qu'il y aura moins d'eau disponible pour divers usages, comme l'agriculture, la consommation d'eau potable ou de l'hydro-électricité.

Pour mieux comprendre l'impact du retrait glaciaire sur l'hydrologie, les chercheurs évaluent l'état de la ressource en eau en fonction du niveau de déglaciation. Des travaux ont en particulier porté sur le rio Santo au Pérou, cours d'eau emblématique car il est alimenté jusqu'à plus de 50 % par les glaciers, selon la saison.



© IRD/B. Franco

## Calculer la contribution des glaciers aux ressources en eau aval

Les glaciers stockent de l'eau à l'échelle de plusieurs dizaines d'années et forment ainsi des réservoirs qui influencent directement les écoulements d'eau en aval. Comprendre et quantifier les apports d'eau de fonte dans le contexte du changement climatique et du retrait glaciaire sont ainsi primordiaux pour suivre l'évolution des ressources en eau actuelles et futures. Mais l'étude du rôle des glaciers dans l'hydrologie d'un bassin versant est complexe. Il faut bien différencier la part d'eau qui annuellement se stocke sous forme de neige, puis est déstockée par fonte sous forme d'eau liquide, de la proportion d'eau provenant réellement du retrait des glaciers et de sa variation de stock. L'étude de ces phénomènes nécessite de bien mesurer chaque mois les précipitations et les taux d'ablation/d'accumulation de neige sur le glacier. Ces dernières mesures glaciologiques consistent à relever l'émergence de balises (piquets implantés dans la glace) et à creuser des puits dans la zone d'accumulation pour calculer le bilan de masse.

Les mesures du bilan de masse couplées aux mesures de précipitations permettent de connaître le volume d'eau écoulé à l'aval provenant de la fusion de neige et de glace du glacier.

### Coupler les méthodes de quantification pour mieux évaluer

Trois autres méthodes permettent également de quantifier les apports glaciaires : des mesures directes de débit dans les rivières, des mesures avec des traceurs hydrochimiques et des bilans hydrologiques réalisés à l'aide de modélisations. Les mesures hydrochimiques se basent sur l'analyse des isotopes stables de l'eau et des ions majeurs, car les différentes sources d'écoulement ont des signatures chimiques particulières et il est ainsi possible de quantifier les apports glaciaires. Les modélisations hydrologiques consistent à simuler les différents types d'écoulement en utilisant des données géomorphologiques caractéristiques du bassin versant et du glacier et des données de forçages météorologiques (température, précipitations, radiations, vent, etc.).

L'idéal est de coupler plusieurs de ces méthodes pour évaluer la concordance des valeurs obtenues. Dans le cadre du laboratoire mixte international Great Ice, trois bassins versants sont largement étudiés, le bassin du Zongo en Bolivie, le massif glaciaire de l'Antizana en Équateur et le rio Santo alimenté en partie par les glaciers de la Cordillère blanche au Pérou. Concernant les taux d'écoulements glaciaires, ils varient dans le temps et dans l'espace. Pour le rio Santo par exemple, les apports glaciaires sont plus importants en saison sèche (plus de 50 % des écoulements) qu'en saison humide (environ 30 %).

Ruisseau glaciaire face au Cotopaxi en Équateur.

Les mesures directes de débit des cours d'eau permettent de quantifier les variations des apports glaciaires.

© IRD/O. Dangles



## La biodiversité d'altitude face au changement climatique

Les régions tropicales de haute montagne représentent des îlots isolés, milieux où la migration de nouvelles espèces est restreinte et la spéciation favorisée. La faible température et la faible pression atmosphérique, le rayonnement solaire intense, les pluies irrégulières, le vent desséchant, le gel, etc. sont autant de conditions extrêmes qui ont poussé les organismes vivants à des adaptations singulières. Les torrents glaciaires imposent également des conditions de vie difficiles à leurs habitants, du fait de leur faible teneur en minéraux et des crues quotidiennes qui génèrent de fortes perturbations. Un haut degré d'endémisme caractérise ainsi les Andes tropicales, avec des espèces uniques au monde mais aussi, par conséquent, un risque d'extinction inexorable si le recul des glaces se poursuit.

### Premières extinctions

Les espèces aquatiques andines sont parmi les premières à enregistrer des extinctions de populations à cause du réchauffement climatique. Les torrents d'altitude ayant été largement transformés par la fonte accélérée des glaces depuis 40 ans, les chercheurs se sont intéressés au rôle fondamental des apports d'eau de fonte pour la vie aquatique. Ils ont constaté que le retrait des glaces a mis en péril une partie des invertébrés vivant dans les rivières (encadré 31). Le rôle écologique de la plupart des espèces menacées demeurant à ce jour méconnu, les conséquences pour les niveaux supérieurs de la chaîne alimentaire – poissons, amphibiens, oiseaux et mammifères – restent difficiles à prévoir.

### Migrations d'espèces

Une élévation de 3 °C des températures moyennes dans les Andes tropicales pourrait entraîner une migration des espèces végétales de près de 600 m vers l'amont. Une telle transformation des écosystèmes d'altitude entraînerait une diminution significative de l'habitat disponible pour de nombreuses espèces. Les espèces de montagne vivent en effet dans des espaces contraints, « coincées » entre l'amont et l'aval. À l'amont, les facteurs liés à la haute altitude, comme les fortes radiations UV ou le manque d'oxygène, limitent la survie de certaines espèces. À l'aval, la compétition avec les autres espèces généralistes – autrement dit, en mesure de prospérer dans un grand nombre de conditions environnementales – qui colonisent des niches thermiques plus favorables pousse les espèces de montagne à continuer à migrer en altitude. Ainsi, elles subissent des réductions de leur aire de distribution plus fortes que celles observées dans d'autres endroits de la planète. Isolées dans des aires réduites, les populations d'espèces d'altitude sont alors particulièrement exposées aux processus d'extinction.

Encadré 31

### Le recul des glaciers menace la biodiversité aquatique

La fonte des glaciers équatoriens a entraîné l'extinction de plusieurs espèces aquatiques.

S'ils venaient à dégeler complètement, 10 à 40 % de la biodiversité régionale risqueraient de s'éteindre.

Des écologues de l'IRD et leurs partenaires européens et équatoriens ont étudié la biodiversité des ruisseaux issus des eaux de fonte dans les *páramos* andins.

Ces écosystèmes herbacés tout à fait particuliers sont caractéristiques des sommets andins, perchés à plus de 3 500 m d'altitude entre la limite de la forêt et les neiges « éternelles ».

Les espèces qui peuplent les cours d'eau de ces milieux extrêmes, principalement des insectes, sont pour bon nombre endémiques.

Les chercheurs ont collecté des échantillons dans une cinquantaine de sites différents dans les *páramos*.

Ils y ont recensé des populations de macro-invertébrés – principalement

des larves d'espèces appartenant aux ordres des Éphémères, des Trichoptères ou encore des Diptères.

Grâce à plus d'un an de prélèvements réguliers, les scientifiques ont identifié dans le seul *páramo* du volcan Antisana, plus de 150 espèces d'invertébrés.

#### De 10 à 40 % d'extinction

Des échantillonnages réalisés à différentes distances des glaciers ont révélé que, dans les Andes, la richesse locale augmente à mesure que l'on s'éloigne vers l'aval.

Par ailleurs, il apparaît que le peuplement des différents ruisseaux à une même altitude est très hétérogène.

À une centaine de mètres de distance, les communautés rencontrées dans deux torrents d'apparence similaire peuvent être bien différentes selon le glacier drainé.

En effet, les glaciers andins ont des dynamiques diverses, fondant plus ou moins vite en fonction de leur taille et de leur exposition au soleil, par exemple.

Ces prélèvements couplés aux données de suivi des communautés aquatiques ont montré que plusieurs espèces commencent à disparaître dès que la couverture glaciaire se réduit à plus de la moitié de la surface du bassin versant.

Et si les glaciers venaient à dégeler complètement, selon la zone considérée, ce sont de 11 à 38 % de la biodiversité régionale qui risqueraient de s'éteindre.

Analyse des ruisseaux glaciaires dans la région des Paramos en Équateur.

© IRD/O. Dangles



Encadré 32

### Modéliser l'impact du changement climatique sur un écosystème clé dans les hautes Andes tropicales

Le projet international Biothaw, qui rassemble des partenaires européens, dont l'IRD, et andins, vise à comprendre et à modéliser l'impact du changement climatique sur un écosystème clé des hautes Andes tropicales : les *bofedales*.

Ces écosystèmes humides de haute altitude (entre 4 000 et 5 000 m) concentrent un niveau exceptionnel de biodiversité.

En développant des sols organiques sur plusieurs mètres de profondeur – véritables « éponges » –, ils ont une très grande capacité de rétention en eau qui approvisionne des millions d'êtres humains en aval, même en période sèche. En outre, leur productivité végétale relativement élevée toute l'année permet d'assurer l'élevage de millions d'animaux domestiques, en particulier lamas et alpagas.

L'approche multidisciplinaire du projet Biothaw utilise le retrait glaciaire récent comme indicateur de changement climatique, avec l'hypothèse sous-jacente que la réduction de la quantité d'eau qui approvisionne les *bofedales* va altérer leur biodiversité et leur fonctionnement.

L'ensemble des données collectées (glaciologie, télédétection, écologie, agronomie, sociologie) seront compilées dans un modèle multi-agents.

Les scénarios de changement climatique prédisent un réchauffement des températures exacerbé ces prochaines décennies dans les écosystèmes tropicaux de haute montagne.

C'est donc à la fois une priorité scientifique et sociétale de caractériser la sensibilité de ces écosystèmes face aux changements climatiques et de proposer des solutions pour maintenir leur fonctionnement optimal.

Échantillonnage d'eau dans une zone humide d'altitude (4 800 m). Cordillère Royale, Bolivie.



© IRD/O. Dangles

## Espèces sentinelles

Outre le retrait glaciaire, d'autres facteurs climatiques affectent la biodiversité. L'augmentation de la température et du rayonnement UV serait en partie responsable de l'extinction des grenouilles du genre *Atelopus*, des amphibiens très sensibles aux changements du milieu. Ce groupe de grenouilles andines, autrefois abondant, s'est considérablement raréfié, voire a disparu de nombreuses régions depuis la fin des années 1980. Si les causes semblent multiples, les chercheurs montrent le rôle des conditions climatiques exceptionnelles et des niveaux élevés d'UV. Espèce sentinelle, ces grenouilles sont également des indicateurs précoces du déclin d'autres espèces.

© IRD/O. Dangles



Grenouille arlequin (*Atelopus* nov. sp. ?)  
Parc national du Sangay (2 200 m), Équateur.  
Les versants à l'est des Andes abritent une grande diversité d'amphibiens avec de nombreuses espèces endémiques des forêts subtropicales.

## Changement climatique et microclimats

Les vallées andines offrent une mosaïque de paysages hétérogènes, échelonnés sur les pentes des montagnes, où règnent autant de microclimats différents. L'étude de ces microclimats revêt une importance particulière dans la compréhension de la réponse des espèces vivantes au changement climatique. Le comportement et la survie des organismes dépendent en effet des conditions environnementales qui dominent à leur échelle. Or, ces conditions climatiques locales ont souvent peu à voir avec les situations climatiques régionales.

### Encadré 33

## Des écarts de température du simple au double entre la réalité locale et les extrapolations régionales

Une étude dans les Andes équatoriennes a mesuré la différence entre les températures locales et les données fournies par la base de données Worldclim.

Les résultats montrent que les conditions microclimatiques génèrent des surestimations et des sous-estimations de l'ordre de 80 % des températures minimum et maximum prédites par les modèles globaux.

Pour évaluer la capacité des systèmes météorologiques à informer sur les processus biologiques, l'unité EGCE et ses partenaires sud-américains se sont intéressés à la différence entre les températures fournies par la base de données Worldclim (extrapolation sur une maille de 1 km<sup>2</sup>) et celles réellement mesurées dans les paysages agricoles des Andes équatoriennes.

Les chercheurs ont d'abord montré l'hétérogénéité des températures dans les champs en fonction du relief, mais aussi de l'endroit précis de la mesure (sol, cultures ou air). Ils ont ensuite comparé ces données avec la base Worldclim. Les résultats montrent que les conditions microclimatiques, notamment celles engendrées par la structure de la végétation, génèrent des surestimations et

des sous-estimations de l'ordre de 80 % des températures minimum et maximum prédites par les modèles globaux.

Les écarts sont les plus notables lorsque la température est mesurée au niveau du feuillage des cultures ou dans le sol, car ces habitats jouent un rôle tampon qui atténue les contrastes thermiques.

Les chercheurs ont ensuite examiné les différences de prédiction de croissance de ravageurs de cultures à partir de Wordclim et de mesures locales. Leurs résultats montrent les limites de modèles qui s'appuient sur des mailles trop grossières pour prédire la dynamique des populations d'insectes dans des régions où il existe une très grande hétérogénéité de microclimats.

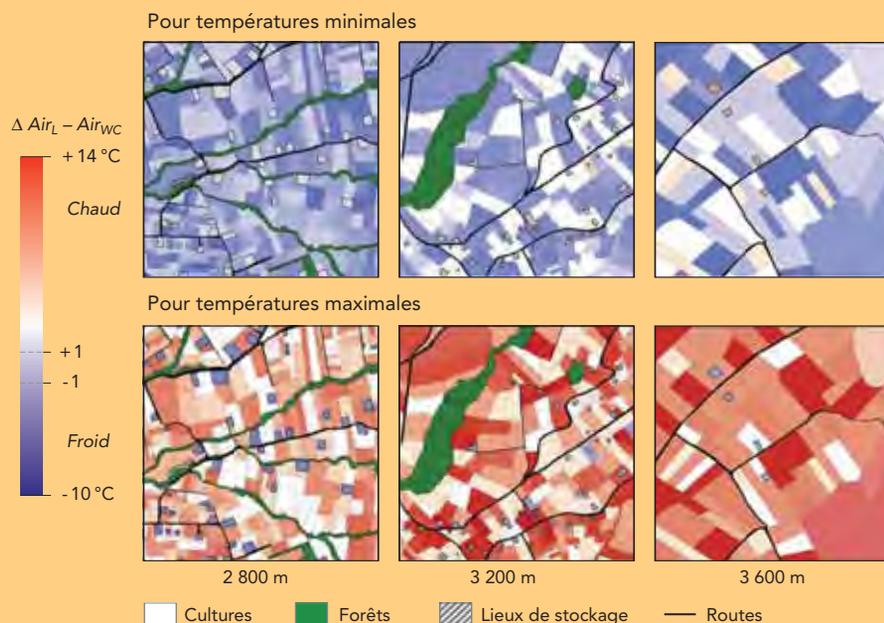


Figure 24. Microclimats de paysages agricoles dans les Andes équatoriennes. Les couleurs indiquent la différence entre la température de l'air mesurée localement et celle prédite à l'échelle globale par le logiciel Wordclim. Les couleurs bleues indiquent que les températures locales sont plus froides que les températures prédites ; et vice versa pour les températures rouges. Source : d'après FAYE et al., 2014.

## Une question d'échelle

Pour connaître les effets du réchauffement régional sur les espèces, il est donc urgent de savoir comment il affecte les conditions microclimatiques. Les chercheurs se consacrent à ce problème d'échelle, entre maille grossière des modèles climatiques et échelle fine des microclimats, en couplant les approches globales et locales. En améliorant les modèles de distribution des espèces à différentes échelles, les simulations climatiques permettront ensuite de mieux prédire les évolutions biologiques. Ces informations sont également importantes pour améliorer les prédictions agricoles, la croissance des cultures étant directement liée aux températures locales.

## Les impacts du réchauffement sur les cultures de l'altiplano

Les agriculteurs des hauts-plateaux andins composent depuis toujours avec l'incertitude climatique. À près de 4 000 m d'altitude, le gel nocturne est une source de stress majeure pour les plantes cultivées sur l'altiplano. Il gèle même en été et surtout en plaine, où l'air froid s'accumule. Pour pallier ce risque climatique, les agriculteurs ont développé au fil des siècles des techniques agricoles originales, ainsi que des dizaines de variétés locales d'une grande diversité génétique.

© IRD/O. Dangles



Culture en terrasses de la pomme de terre dans les Andes au Pérou. Cette agriculture est pratiquée de 2 000 m à 4 500 m avec une variété de pomme de terre spécifique pour chaque palier d'altitude.

Les risques climatiques se sont modifiés dans les Andes depuis quelques décennies, à cause du changement climatique mais également suite au changement d'usage des terres. C'est ce qu'illustre l'essor de la culture de quinoa au sud de l'altiplano bolivien. Face au succès commercial de la graine, la production augmente d'année en année : entre 1972 et 2005, la superficie cultivée dans cette région a triplé. Les agriculteurs ont mis en culture les terres situées dans les plaines, faciles à mécaniser mais à priori plus sujettes aux gelées nocturnes que les pentes. Jusqu'à présent, le réchauffement climatique a plutôt favorisé l'extension des cultures, car il a réduit le risque de gel en plaine et fait remonter de quelques centaines de mètres les zones climatiques propices à la culture de quinoa.

Mais la rapidité et la complexité des changements observés, qui dépendent à la fois du climat et de l'usage des terres, pourraient affecter plus drastiquement les conditions pédoclimatiques, avec des conséquences négatives pour les cultures. Des projections croisant production agricole et scénarios climatiques montrent qu'après un effet favorable, mais transitoire, de diminution du risque de gel, l'augmentation probable des épisodes de sécheresse dans les décennies à venir réduira les rendements (encadré 34).

Une agricultrice participe à une séance de formation à la lutte contre les ravageurs à Chaopcca, Pérou.

© IRD/O. Dangles



## Interactions écologiques et ravageurs de cultures

Les rendements agricoles vont également être influencés par les effets du changement climatique sur les interactions écologiques. Toutes les espèces vivent en interaction avec d'autres espèces, que ce soit les prédateurs avec leurs proies, les parasites avec leurs hôtes ou les pollinisateurs avec les plantes qu'ils visitent. Les effets du changement climatique sur des espèces plus sensibles auront des conséquences en cascade via ces interactions, en particulier le long des chaînes trophiques. Selon certains biologistes, ces impacts sur les interactions entre espèces pourraient peser plus sur la biodiversité que les impacts directs du climat.

Dans les Andes, les chercheurs ont examiné en particulier comment les changements de température influencent les relations interspécifiques des ravageurs de cultures, et quels sont les effets sur les attaques subies par les plantes. Les études

Encadré 34

### Évaluer la production de quinoa en fonction des scénarios climatiques

Sur l'altiplano aride au sud de la Bolivie, la production de quinoa dépend largement de l'humidité du sol et du risque de gel. Des chercheurs de l'IRD et leurs partenaires boliviens ont modélisé l'évolution de cette production à l'horizon 2050 et 2100, en fonction des scénarios climatiques couramment admis.

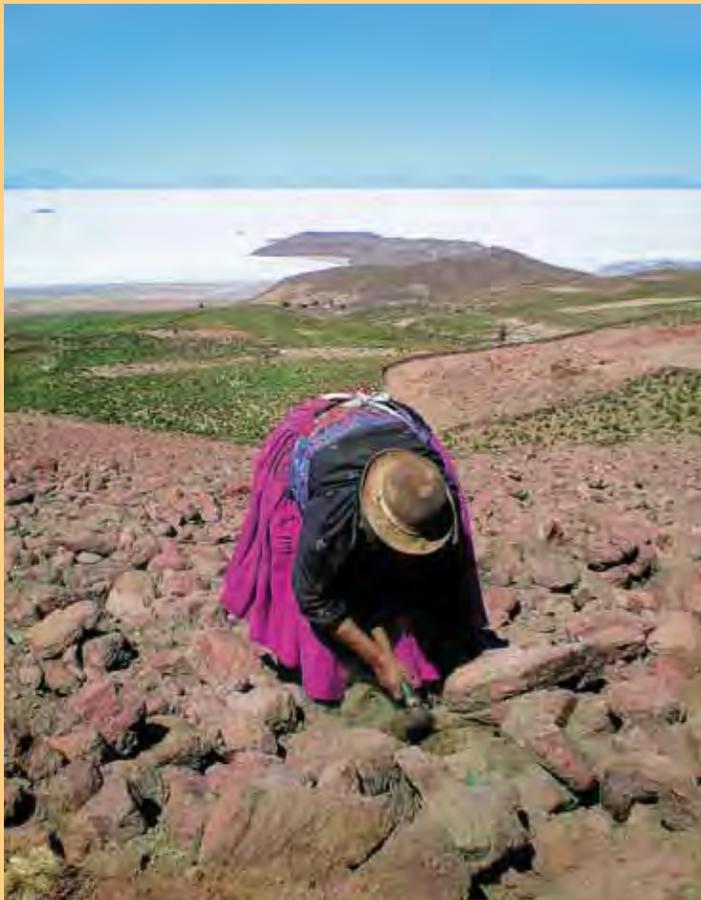
Pour appréhender l'impact local du changement climatique, les chercheurs ont distingué différents types de paysages tout en travaillant à l'échelle d'une région entière, le pourtour du salar d'Uyuni (désert de sel).

Autrefois partagée entre agriculture et élevage, cette zone semi-désertique, où le gel sévit plus de 250 jours par an, est devenue la première région exportatrice de quinoa au monde.

Les simulations montrent qu'après le pic de production actuel, résultat de la diminution du risque de gel et de la conversion des pâturages en cultures, la production à venir pourrait décliner sensiblement sous l'effet conjugué de l'augmentation des épisodes de sécheresse, de la saturation de l'espace agricole et de la perte de productivité des sols.

Cette modélisation met en jeu le climat et l'usage des terres, deux composantes majeures du changement global, trop souvent dissociées dans les travaux de recherche. Pour les acteurs locaux, cet exercice prospectif éclaire le débat sur la durabilité de leurs choix de développement dans un contexte climatique et socio-économique changeant.

Semis de quinoa sur le flanc du volcan Tunupa en Bolivie.



© IRD/A. Vassas Toral

montrent qu'il n'y a pas d'effet linéaire entre la température et les attaques des insectes et autres nuisibles, à cause de la complexité de leurs interactions et des optimums thermiques différents selon les espèces. Ainsi, en fonction des conditions de température auxquelles ils sont soumis, des ravageurs peuvent soit entrer en compétition, soit au contraire entretenir des interactions positives entre eux (par exemple de facilitation). Les chercheurs tentent donc d'affiner les modèles de prévision en intégrant la complexité des interactions biologiques.

Encadré 35

### **Kenya : autre région d'altitude où le réchauffement aggravera les dégâts des ravageurs des cultures**

Principale ressource alimentaire de l'Afrique de l'Est, le maïs occupe près de 80 % des surfaces cultivées de cette région, notamment sur les pentes montagneuses du mont Kilimandjaro et des monts Taita.

Les rendements faibles, de l'ordre de 1 à 3 t/ha, sont attribués aux mauvaises conditions climatiques et aux insectes.

Or, ces contraintes devraient s'accroître avec le changement climatique.

Les études menées depuis 2010 par l'unité de recherche 72\* dans ces régions montagneuses du Kenya permettent de mieux comprendre l'influence de la température et de l'altitude sur la distribution des deux principaux ravageurs du maïs (le crambide exotique *Chilo partellus* et la noctuelle indigène *Busseola fusca*).

Les chercheurs se sont également intéressés à la répartition des ennemis naturels des ravageurs (les parasitoïdes larvaires) pour prendre en compte les interactions entre espèces.

Leur étude confirme que la température est un facteur clé de ces interactions

permettant d'expliquer, en partie, la prédominance de *C. partellus* aux basses altitudes et celle de *B. fusca* aux altitudes élevées.

#### **Migration plus rapide du crambide que de son parasite**

À partir de modèles phénologiques sur la présence et l'activité des ravageurs et de leurs parasitoïdes en fonction du climat, ils ont généré des cartes de risque basées sur les données météorologiques des stations locales et des scénarios climatiques du Giec.

Leurs prévisions suggèrent que l'augmentation de l'activité des ravageurs liée au réchauffement de la température devrait se traduire par une augmentation significative des pertes de récolte en maïs dans toutes les zones agro-écologiques étudiées, comprise entre 5 et 20 % selon les altitudes et l'espèce de ravageur. L'altitude est par ailleurs un facteur d'impact aggravant, lié à l'extension au-dessus de 1 200 m de l'aire de distribution du crambide et au déplacement moins rapide

\* Biodiversité et évolution des complexes plantes-insectes ravageurs-antagonistes.

de son ennemi naturel, ce qui devrait se traduire par un contrôle biologique moins efficace de ce ravageur aux altitudes supérieures à 1 200 m.

#### Augmentation de la silice dans le maïs avec la température

Le maïs utilisant l'accumulation de silice dans ses tissus pour se défendre contre certains ravageurs, dont la noctuelle, les chercheurs ont également voulu comprendre comment l'augmentation de la température était susceptible de modifier les teneurs en silice dans la plante. Leurs résultats montrent que les concentrations en silice du sol et du maïs diminuent avec l'altitude et que l'assimilation de la silice par le maïs augmente avec la température.

Ces résultats confirment les optimums thermiques des deux espèces, expliquant la prédominance actuelle de la noctuelle aux altitudes élevées.

Le réchauffement devrait à l'avenir accroître l'assimilation en silice des plantes et, par conséquent, favoriser le déplacement du crambide vers des altitudes plus élevées.



Maïs infestés par des noctuelles (*Busseola fusca*) au Kenya.

© IRD/P.-O. Calatayud

Condom Thomas, Lebel Thierry, Winkel Thierry, Dangles Olivier, Calatayud Paul-André, Le Ru Bruno, Sylvain J.F. (2015).

Zones d'altitude : la transformation rapide des milieux andins.

In : Reinert M., Janicot Serge (ed.), Aubertin Catherine (ed.), Bernoux Martial (ed.), Dounias Edmond (ed.), Guégan Jean-François (ed.), Lebel Thierry (ed.), Mazurek Hubert (ed.), Sultan Benjamin (ed.), Sokona Y. (pref.), Moatti Jean-Paul (pref.).

Changement climatique : quels défis pour le Sud ?

Marseille : IRD, 129-143. ISBN 978-2-7099-2168-8