

Changement climatique et domaines skiables : simulation en Savoie et Haute-Savoie à l'horizon 2015

Jean-Christophe Loubier

Université de Genève

Résumé.— Les domaines skiables et le changement climatique posent des questions importantes et nouvelles pour les espaces montagnards. Dans les hautes vallées où ces domaines sont souvent le moteur principal du développement local, on peut s'interroger sur la pérennité du modèle économique de l'or blanc à moyen terme quand les modèles de simulation du climat tablent sur une élévation de la température moyenne comprise entre 1.5° et 5° en 2100. Nous avons tenté de simuler les effets du changement climatique à l'horizon 2015, sur les domaines skiables de Savoie et Haute Savoie.

Alpes françaises • Changement climatique • Domaine skiable

Abstract.— **Climate changes and skiing fields : simulation in Savoie and Haute-Savoie in the prospect of 2015.**— The skiing fields and climate changes lead to important new questions about mountain areas. In the high valleys where these fields are often the mainspring of the local development, we may wonder about the mid-term durability of the economic model of the “white gold” when climate simulation models bank on a raising of the average temperature included between 1.5° and 5° in 2100. We have tried to simulate the effects of climate change in the prospect of 2015, on the skiing fields of Savoie and Haute-Savoie.

Climate change • French Alps • Skiable field

Resumen.— **Cambio climático y campos de esquí: simulación en Saboya y Alta-Saboya para el horizonte 2015.**— Los campos de esquí y el cambio climático presentan problemas importantes y nuevos para los espacios montañoses. En los altos valles donde estos campos constituyen el principal motor del desarrollo local, se puede preguntar sobre la perennidad a termino medio del modelo económico del oro blanco, cuando los modelos de simulación del clima hablan de la elevación de la temperatura media de 1°5 hasta 5° en 2100. Hemos tratado simular estos efectos para el horizonte 2015 en los espacios esquiables de Saboya y Alta-Saboya.

Alpes franceses • Cambio climático • Campo esquiable

Introduction

Le changement climatique oblige à s'interroger sur la viabilité du modèle économique du tourisme d'hiver en montagne. Dans beaucoup de hautes vallées alpines, la présence humaine est, pour l'essentiel, conditionnée par celle d'un domaine skiable. Ainsi, dans la Tarentaise, Bourg-Saint-Maurice n'offrirait sans doute pas le même visage sans l'économie du ski de masse, alimenté par une ligne TGV.

Le devenir des domaines skiables dans un contexte de réchauffement global est un enjeu politique, économique et environnemental. Pouvons-nous, à l'heure actuelle, identifier les domaines skiables qui seront concernés au premier chef par les effets du changement climatique sur l'enneigement ? Quelles seront leurs difficultés et quand surviendront-elles ? Peut-on déjà apprécier les conséquences probables sur le développement local ? Nous



1. Les principaux domaines skiables de Haute-Savoie

tentons de répondre à ces questions par une démarche de simulation climatique appliquée aux domaines skiables de Savoie et Haute-Savoie.

I. Une démarche de simulation

La Savoie et la Haute-Savoie concentrent les trois quarts des emplois et du chiffre d'affaires annuel total de l'économie du ski française. On peut donc raisonnablement penser que le poids du changement climatique se fera sentir avec plus d'acuité dans ces départements qu'ailleurs (fig. 1).

Méthode d'analyse spatiale

Nous reprenons les valeurs de simulations climatiques régionales proposées par la communauté scientifique en les affectant à une échelle

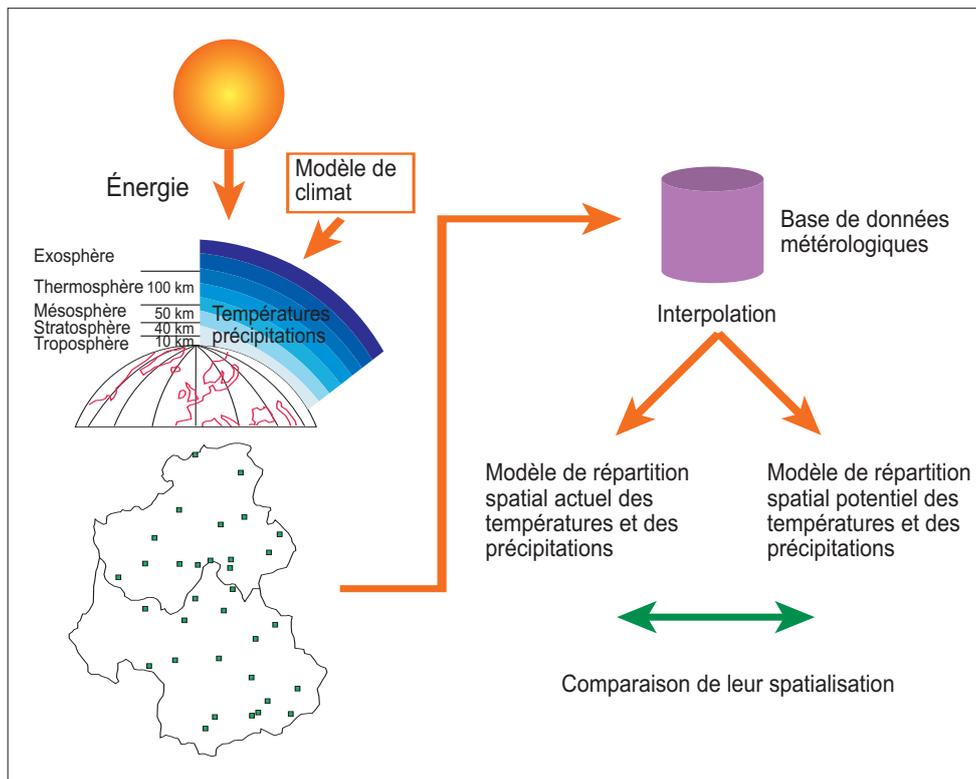
pertinente. Ceci permet de construire des modèles interpolés des phénomènes climatiques (Loubier, 2004a). Nous comparons les cartes issues des simulations avec celles qui sont issues des mesures habituelles.

Nous avons couplé un *modèle général de climat* (MGC, ici le *Java Climate Model* du GRID) (fig. 2), à un système d'information géographique (SIG) en mode image (encadrés). Les MGC proposent des simulations dont le niveau de résolution ne permet pas de traduire le changement climatique à l'échelle locale. Nous avons donc développé une méthode de changement d'échelle (et c'était là la principale difficulté) fondée sur l'étude et l'optimisation de l'interpolation spatiale à partir d'un semis de stations météorologiques.

La simulation repose sur deux axes fondamentaux :

- l'incrémentation des valeurs de température et de précipitations sur le réseau de stations météorologiques présentes à la fois dans notre zone et à l'intérieur d'une maille du modèle de circulation climatique ;
- une opération d'interpolation par la méthode des splines bi-cubiques, des valeurs de température et précipitations à partir d'un semis enrichi de stations météorologiques virtuelles vérifiées par validation croisée.

Les cartes sont fondées sur la représentation d'une probabilité de survenue de neige en cas de précipitation. L'apparition de neige est une relation entre des valeurs de température moyenne mensuelle et des hauteurs de précipitations moyennes mensuelles en un même lieu. Dans cette relation, il existe une valeur centrale où cette probabilité est optimale, ici la



2. Méthodologie de l'étude

température 0°. Au-delà et en deçà de cette valeur, la probabilité décroît de façon sigmoïde. L'avantage est de standardiser toutes les échelles de températures sur le même référentiel chromatique.

Données initiales et niveau scalaire

Les données spatiales par nature correspondent au modèle numérique de terrain (MNT) BD-alti en Lambert III de l'IGN au pas de 50 mètres sur les deux départements de l'étude. Le maillage du *modèle général de climat* correspond à un degré d'arc en latitude/longitude. Notre terrain d'étude est couvert par deux demi-maillages du modèle de climat de part et d'autre du 45^e parallèle de latitude N et entre le 6^e et le 7^e méridien de longitude E. Les domaines skiables sont représentés par un point créé au barycentre de leur enveloppe, soit à partir des données photogrammétriques au 1/5000 fournies par la société ORODIA, soit à partir d'une numérisation sur le fond TOP 25 de l'IGN. Le semis de stations météorologiques est celui de la base ER30. Chaque station est positionnée en coordonnées Lambert III.

L'étendue de l'échelle des données initiales est large (de 1° d'arc pour les informations du modèle climatique au 1/5000 pour les données topographiques des grands domaines de la Tarentaise). Cependant, les informations issues des modèles de climat ne sont spatiales que par destination car elles sont incrémentées aux valeurs attachées au semis des stations météorologiques. L'échelle minimale réelle d'analyse est donc celle liée aux données numérisées sur les cartes au 1/25000. Cependant, les cartes présentent le phénomène sur tout le champ d'étude. Afin que ce dernier soit totalement embrassé, nous avons réduit cette échelle au 1/200000 après la simulation.

Les animations

Les cartes ont été réalisées avec un outil de modélisation 3D conçu pour la synthèse d'image, 3DSMax (1). La création s'est développée en trois temps :

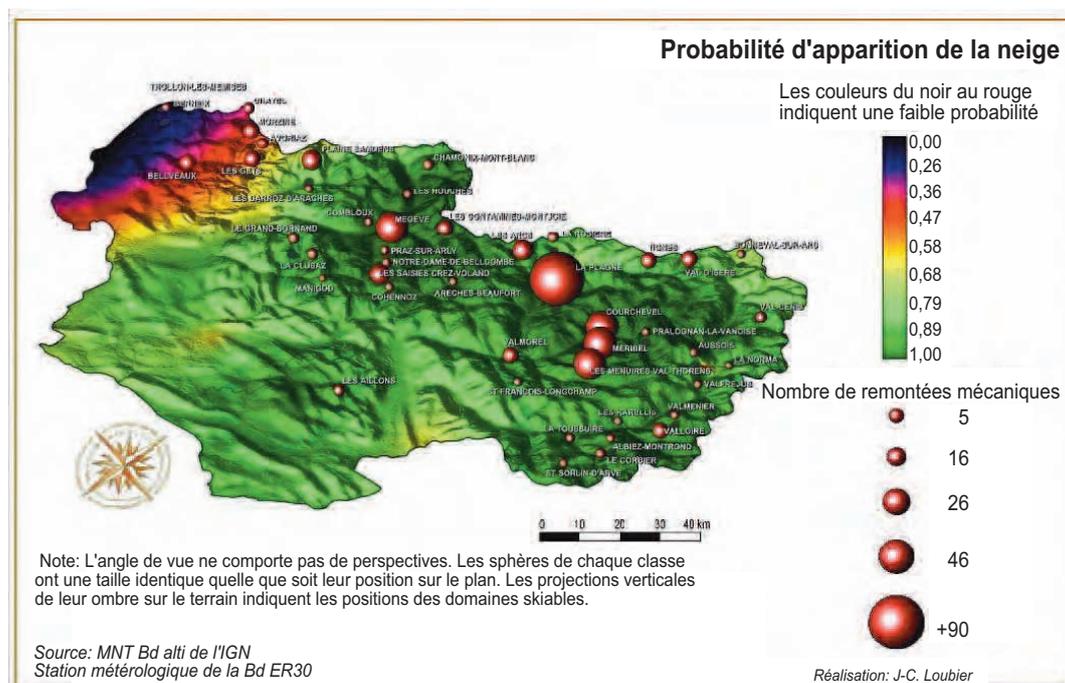
- la création de l'environnement 3D de la scène (modèle de terrain, volumes représentant le nombre de remontées mécaniques, éclairage);
- le drapage des informations de simulation sur le modèle de terrain et le calcul final de l'image;
- l'habillage et le calcul des animations.

Le modèle de terrain de la scène est dérivé du MNT Bd alti de l'IGN au pas de 50 m. L'échelle du 1/200 000 autorisait une dégradation des formes pour peu que la vision d'ensemble du territoire ne soit pas dénaturée. Nous avons donc développé la procédure suivante pour construire une scène à la fois légère et ressemblante :

- exportation d'une image du MNT bd alti codé en niveaux de gris
- création d'une grille 100 x 100 représentant le plan de scène
- importation de l'image sur la grille au dans le logiciel 3DsMax et indication de la valeur d'altitude minimale et maximale, le blanc correspondant à l'absence d'informations.
- lissage du résultat par la fonction *bump mapping*.

Ces opérations permettent de simuler le relief à l'échelle requise. Les volumes sont réalisés avec les fonctions de modélisation de la boîte à outils du logiciel. Leur calibration le long d'une loi exponentielle est définie par la suite. Il ne reste alors plus qu'à spécifier les éclairages. Nous avons opté pour un éclairage spéculaire à 45° gauche de la scène. Cet effet permet de renforcer l'effet de relief du terrain.

Nous avons exporté les résultats des simulations obtenues au sein du SIG sous la forme d'une image bitmap codée en 8 bits 256 couleurs. Ces images ont été drapées une par une sur le modèle de terrain. Enfin le logiciel de synthèse d'image a calculé un rendu final haute résolution. C'est cette image que nous avons importée dans un dernier logiciel de mise en page pour l'habillage final. Ce dernier point comprend le placement des noms de domaines skiables sur la scène et le placement des légendes et échelles. Cela fait, nous avons calculé un diaporama pour les deux périodes (actuelle et simulation du scénario A1B). Les cartes présentées ne sont donc pas composées exclusivement d'objets 3D. Il s'agit plutôt d'une addition d'objet 3D et 2D utilisés en fonction des besoins.



Animation : Modélisation de l'enneigement en Savoie à l'horizon 2015

Les scénarios

Nos choix initiaux relatifs aux simulations climatiques reposent sur des standards et des recommandations données par le Groupement Intergouvernemental d'Étude du Climat (2).

Les scénarios de type A1 proposent un futur où la croissance économique sera très rapide avec des technologies de plus en plus puissantes employées rapidement. La population mondiale augmentera encore pour se stabiliser au milieu du siècle. Elle commencera à décliner ensuite. Les thèmes principaux mis en action dans cette catégorie de scénarios sont un lissage des disparités actuelles avec un renforcement des interactions socioculturelles.

La description des moyens d'acquisition de l'énergie dans ces scénarios a donné naissance à trois sous-groupes : les types A1FI, A1T et A1B. Ces scénarios partagent l'idée d'un investissement important sur le plan technologique. Seule la source énergétique employée préférentiellement les distingue. Le scénario A1FI laisse la plus grande part à l'énergie fossile. Le scénario A1T privilégie toute autre source que fossile. Enfin, le scénario A1B propose une voie médiane. C'est ce dernier scénario que nous avons choisi.

Nos résultats sont ceux d'une étude comparative mensuelle entre les mesures habituelles et celles probables en 2015 dans le contexte défini par le scénario A1B du GIEC. Les moments les plus stratégiques pour un domaine skiable se situent en début et en fin de saison. Ces deux périodes sont celles qui utilisent le plus les systèmes de neige de culture. Cependant, les simulations que nous proposons concernent toute la saison d'hiver.

II. Les résultats

Les domaines skiables en situation habituelle

La disposition habituelle des températures minimales moyennes (avec une conformité spatiale de 72,4 %) recoupées avec la carte de la position des domaines skiables nous permet de décrire un comportement global des principaux domaines de Savoie et de Haute-Savoie. D'une façon générale, en début de saison (novembre, décembre), les domaines de *Thollon-Les Mémises* et *Bernex* se situent dans un espace où la probabilité d'atteindre la température de 0° ou moins est la plus faible (entre 0 % et 21 % de probabilité).

Les domaines de *Châtel* et *Bellevaux* suivent, avec une probabilité autour de 40 %. La tranche suivante concerne *Les Gets*, *Avoriaz*, *Morzine* avec 55 à 65 % de chances de survenue de neige naturelle. Partout ailleurs, les probabilités des domaines de constituer une couverture neigeuse en cas de précipitation sont, au minimum, de l'ordre de 80 %. Nous remarquons que les domaines situés en moyenne montagne comme *La Clusaz*, *Les Aillons*, *Le Grand Bornand* présentent des chances équivalentes à celles de domaines placés dans les massifs internes comme ceux de Tarentaise.

En fin de saison (mars, avril), c'est principalement l'altitude qui détermine les chances de maintenir le manteau neigeux. Pour cette période, beaucoup de domaines se retrouvent en situation thermique faible. Les domaines de *Bellevaux*, *Les Aillons*, *Saint-François Lonchamp* et *Valmorel* sont ceux qui ont la plus faible probabilité (< 35%) de conservation d'un manteau neigeux en cas de survenue de précipitations. En revanche, les domaines de *Thollon-Les Mémises* et *Bernex*, desservis en début de saison se maintiennent dans une probabilité supérieure à 35 %. Enfin, les domaines de Tarentaise sont situés dans un intervalle faible (entre 25 et 35 % de chances). Cependant, pour ces derniers, il convient de pondérer ce résultat. Compte tenu de leur développement en altitude, cette situation n'est pas équivalente partout sur les sites et concerne plutôt les parties basses de ces domaines. Cette situation est bien connue et les grands domaines concentrent leurs efforts sur le maintien d'une ou deux pistes pour le retour skis aux pieds en fin de saison.

Simulation à quinze ans

L'analyse de tendance s'appuie sur le scénario A1B avec une perspective de stabilisation du CO₂ atmosphérique à 550 ppm en 2150. D'une façon générale, la probabilité d'une faible couverture neigeuse se fait sentir plus tard en début de saison et plus tôt en fin. En début de saison, la tendance spatialisée pour le mois de novembre montre qu'une grande partie du territoire est gagnée par une réduction de probabilité de température égale ou inférieure à zéro. Cette réduction s'opère principalement dans la tranche des 50 % de chances qui, habituellement, concernent les zones de piémont et des Préalpes. Pour décembre, l'impact est faible et la situation est comparable au contexte habituel.

La réduction de probabilité la plus importante concerne le petit domaine de *Bonneval-sur-Arc* avec une réduction de 85 % à 65 % de chances de recevoir de la neige en cas de précipitation. L'étude longitudinale des probabilités dans le cœur de saison (janvier février) met en évidence la faiblesse potentielle de domaines comme *Thollon-Les Mémises* ou *Bernex* pour une garantie de neige. La probabilité reste aux alentours de 30 %. D'autres domaines sont fragilisés avec une probabilité de l'ordre de 50 % de chances. C'est le cas de *Morzine*, *Bellevaux* et *Châtel*. Le domaine de *Bonneval-sur-Arc* voit sa probabilité rester autour de 60 %. D'un point de vue purement quantitatif, ce domaine est cependant celui qui perd le plus de probabilité dans cette simulation même si sa situation demeure relativement confortable par rapport à d'autres domaines skiables.

En revanche, la situation de fin de saison intervient plus tôt qu'en période habituelle. Le cas des grands domaines de Tarentaise est, à ce titre, tout à fait caractéristique. Le potentiel d'exploitation diminue fortement au mois de mars et la réduction de probabilité gagne les hauteurs. Si l'activité reste possible sur les parties supérieures des domaines, le retour skis aux pieds semble compromis. Pour les domaines situés en moyenne montagne, la situation devient délicate dès le début du mois de mars. La probabilité décroît rapidement jusqu'à rendre la pratique impossible bien avant les vacances de Pâques qui marquent la fin de saison. On peut raisonnablement considérer que la saison potentielle pour ces domaines se déroulera entre le mois de décembre et la fin février. L'érosion dans le contexte du scénario A1B est donc d'environ un mois.

Conclusion

Pour les domaines skiables de Savoie et de Haute-Savoie où l'activité ne serait pas complètement remise en question, le changement climatique poserait néanmoins de sérieux problèmes en début et en fin de saison. La contraction de la saison impliquerait un recours massif à la neige de culture pour garantir l'activité. Ceci ne peut qu'engendrer des problèmes environnementaux et des conflits d'intérêt (dans le cadre de la gestion de l'eau notamment).

Le changement climatique pourrait fortement affecter l'économie du ski. C'est pourquoi les domaines skiables devront faire l'objet de stratégies visant à pérenniser leurs activités. Pour certains d'entre eux, comme les domaines du Chablais, c'est même le modèle économique du tourisme d'hiver qui semble remis en cause. Un développement fort des activités touristiques d'été (qui est déjà engagé) pourrait compenser la situation et garantir une exploitation durable de la montagne.

Bibliographie

BENISTON M., dir. (2002). *Climatic Change. Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management. Advances in Global Change Research*. Dordrecht, Boston : Kluwer Academic Publishers, 503 p.

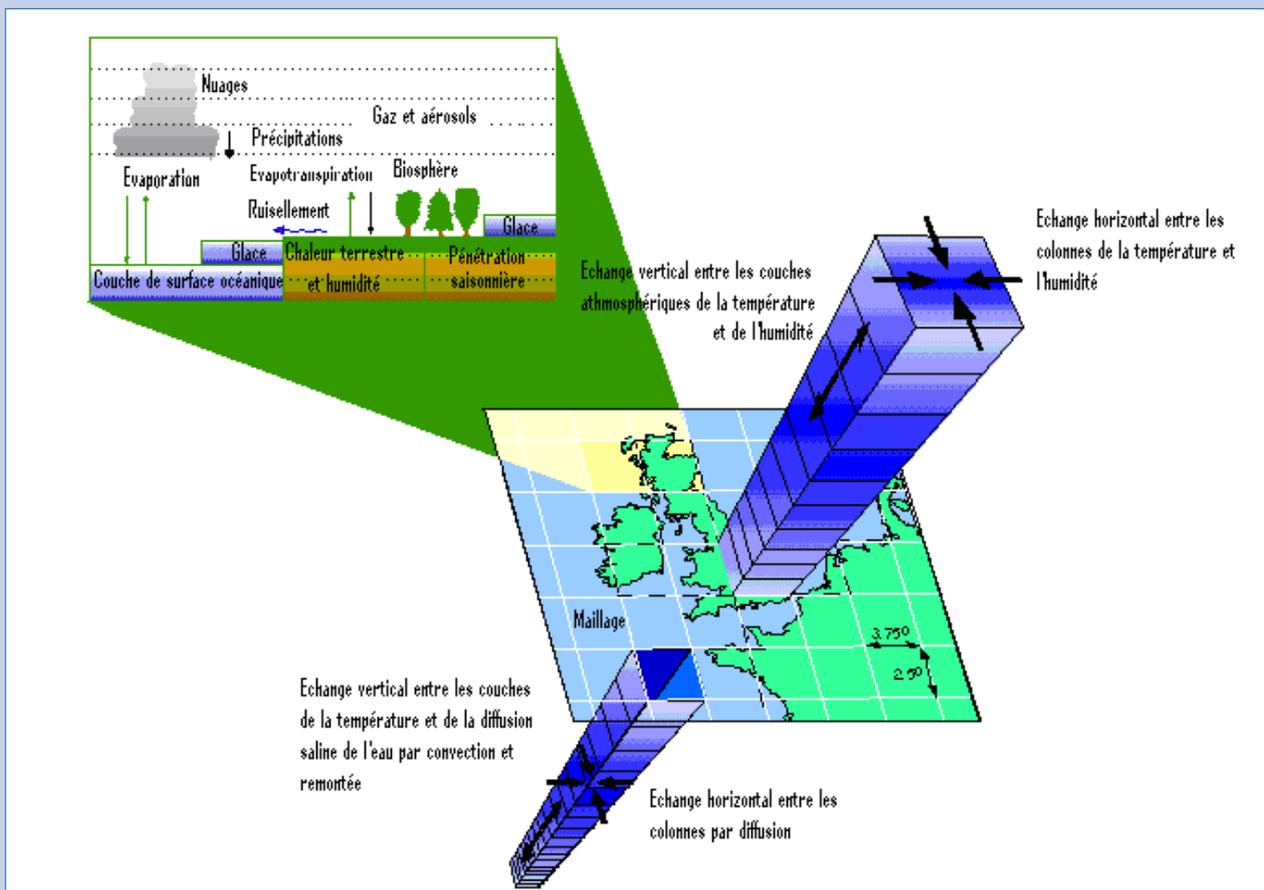
Principes des modèles de circulation climatique

La simulation du climat dans un modèle général de climat (MGC) se traduit en pratique par le calcul d'une valeur (température, précipitations...) aux nœuds d'une maille qui couvre l'ensemble de notre planète. La taille de cette maille joue un rôle considérable pour la discrétisation et la régionalisation des effets du changement climatique.

D'une façon générale, plus elle est fine, plus la précision du modèle s'améliore. Cependant, le temps de calcul pour mener la simulation à son terme augmente largement. Pour contourner cette difficulté, les modèles les plus récents sont capables de mettre en œuvre la simulation sur un maillage irrégulier. Par exemple, sur l'océan, la

maille de base aura une taille de 500 kilomètres de côté alors que sur les terres émergées, elle aura une taille de 50 à 100 kilomètres. Cette maille est tridimensionnelle (comme le réel physique). Avant chaque simulation, il convient de définir les conditions initiales (état du milieu, type d'occupation du sol...) de chacune de ces mailles.

On décrira donc la composition physique du milieu sur lequel elle se trouve (terre, mer, occupation du sol) mais aussi l'état de l'atmosphère (composition, nébulosité, taux d'humidité...) au moment T0 de la simulation. La **figure 3** ci-dessous montre la structure d'une maille pour le modèle de circulation climatique anglais du Hadley Center.



3. Modèle conceptuel du maillage pour le modèle de circulation climatique du Hadley center
(Source : Hadley center <http://www.cru.uea.ac.uk/link/hadcm2/3DGCM.html>)

- BENISTON M., KELLER F., GOYETTE S. (2003). « Snow pack in the Swiss Alps under changing climatic conditions: an empirical approach for climate impacts studies ». *Theor. and Appl. Clim.*, 74, p. 19-31.
- BENISTON M. (2000). *Environmental Change in Mountains and Uplands*. Londres-New York : Arnold-Hodder, Stoughton-Chapman, Hall Publishers-Oxford University Press, 172 p.
- BENISTON M. (2003). « Climatic change in mountain regions : a review of possible impacts ». *Climatic Change*, 59, p. 5-31.

Présentation du Java Climate Model (GRID) utilisé pour l'étude

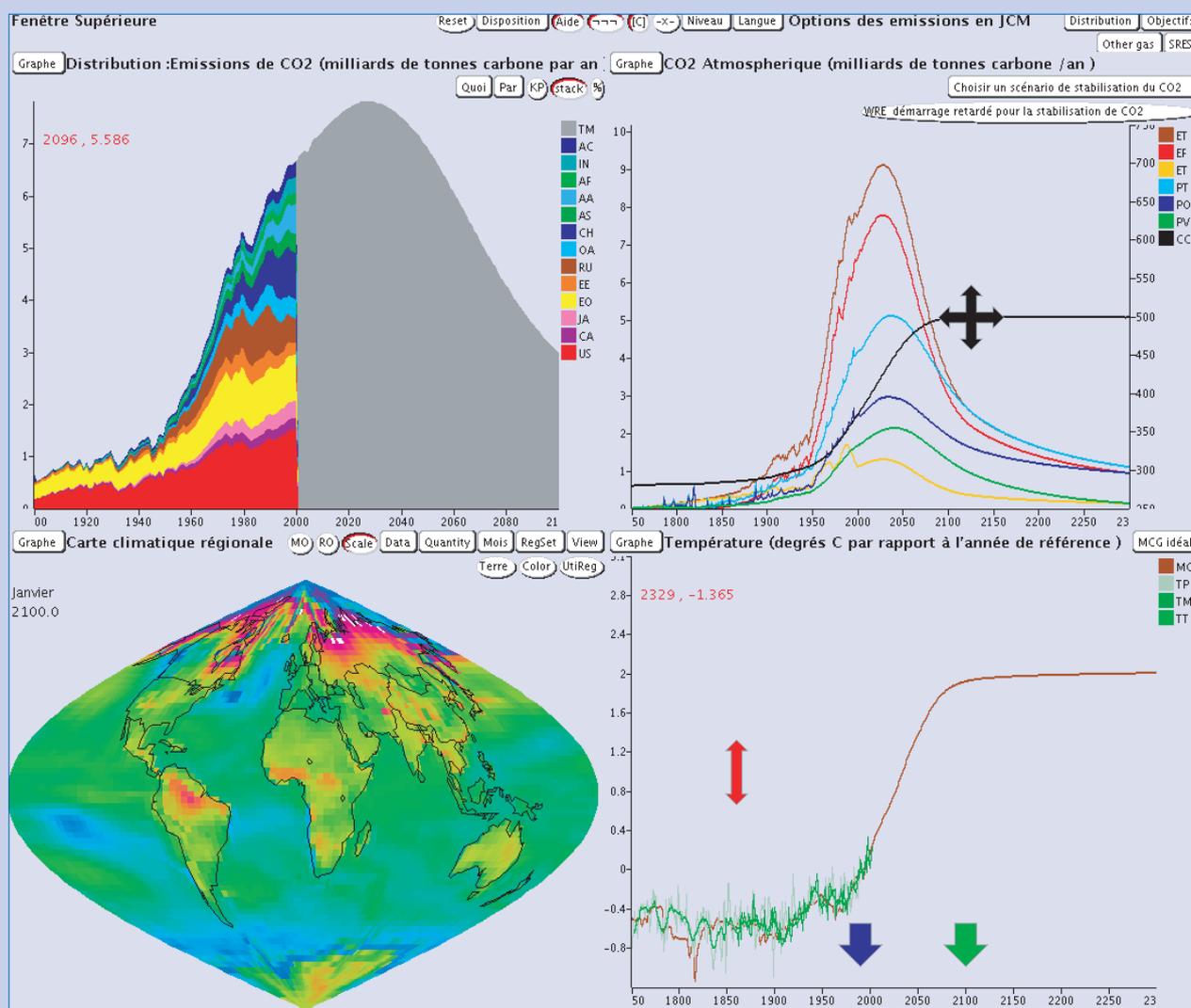
Ce modèle (fig. 4) est une version empirique des modèles climatiques tridimensionnels du type Hadley, fondés eux sur la résolution de systèmes d'équations thermodynamiques : il ne décrit pas les mécanismes du climat, mais seulement la sensibilité du climat à certains paramètres.

Ce modèle a été conçu pour simuler facilement des variations futures du climat, compte tenu de certains paramètres climatiques et des émissions prévues des gaz à effet de serre. L'objectif poursuivi par cet outil est de faciliter la compréhension des enjeux du changement climatique par une simulation valable mais facile d'accès pour des non spécialistes du climat.

Les émissions de gaz à effet de serre peuvent être définies de deux façons très différentes :

- par un des scénarios prédéfinis par le GIEC à partir de différentes prévisions économiques basées sur la croissance démographique, le développement technologique, etc. Dans ce cas on ne vise aucun but en termes de température ou CO₂ dans le futur. Ces scénarios sont indiqués dans le menu 'SRES' (Special Report on Emission Scenarios);

- par un objectif fixé explicitement par l'utilisateur, par exemple une température globale, un niveau de la mer, ou une concentration atmosphérique en CO₂. On vise dans ce cas un objectif précis à une certaine échéance, par exemple stabiliser la concentration de CO₂ à 500ppm à partir de l'année 2100. Ces objectifs peuvent être fixés via le menu 'Objectifs' de l'interface.



4. Copie d'écran d'une partie de l'interface (Source : <http://www.chooseclimate.org/jcm/index.html>)

- BRUN E., MARTIN E. (1995). « Modélisation du manteau neigeux à différentes échelles. Application au domaine des avalanches, de l'hydrologie et du climat ». *La Houille blanche*, n° 5/6, p. 63-68.
- GIEC (GROUPEMENT INTERGOUVERNEMENTAL D'ÉTUDE DU CLIMAT) (2001a). *Climate Change 2001: The scientific basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 892 p.
- GIEC (GROUPEMENT INTERGOUVERNEMENTAL D'ÉTUDE DU CLIMAT) (2001b). *Climate Change 2001: Impact, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 1042 p.
- GIEC (GROUPEMENT INTERGOUVERNEMENTAL D'ÉTUDE DU CLIMAT) (2001c). *Bilan 2001 des changements climatiques: Les éléments scientifiques. Contribution du groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat*. IPCC, 92 p.
- GIEC (GROUPEMENT INTERGOUVERNEMENTAL D'ÉTUDE DU CLIMAT) (1995). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Cambridge: Cambridge University Press.
- GIEC (GROUPEMENT INTERGOUVERNEMENTAL D'ÉTUDE DU CLIMAT) (1996). *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific Technical Analyses*. Cambridge: Cambridge University Press, 879 p.
- HUNT B.G, DAVIS H.L. (1997). « Mechanism of multi-decadal climatic variability in a global climatic model ». *International Journal of Climatology*, 17, p. 565-580.
- HUNT B.G. (1998). « Natural climatic variability as an explanation for historical climatic fluctuation ». *Climatic Change*, 38, p. 133-157.
- JANCOVICI J.-M. (2002). *L'Avenir climatique: Quel temps ferons nous ?*. Paris: Seuil, 284 p.
- SEATM (SERVICE D'ÉTUDE ET D'AMÉNAGEMENT TECHNIQUE DE LA MONTAGNE) (1990). *Aménagement des pistes des ski alpin*. s.l.: SEATM, 40 p.
- LOUBIER J.-C. (2004a). « Un exemple d'analyse SIG pour l'amélioration de l'interpolation de données climatiques ». In CASSINI 04: *Géomatique et analyse spatiale*, p. 125-131.
- LOUBIER J.-C. (2004). *Perception et simulation des effets du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité (Savoie et Haute-Savoie)*. Grenoble: Université Joseph Fourier-Grenoble I, thèse de géographie, 6 mai 2004, http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/69/90/index_fr.html

Notes

1. 3DS Max est développé par Autodesk.
2. Le GIEC est une instance scientifique qui, sous l'égide de l'ONU, est chargée de faire la synthèse, sous la forme de rapports édités tous les quatre ans, de la production scientifique ayant trait au changement climatique. Sa dernière réunion plénière s'est déroulée à Paris du 27 janvier au 1^{er} février 2007.

Adresse de l'auteur

Département de géographie, Université de Genève, Bd. du Pont-d'Arve 40, CH-1211 Genève 4. Tél. +41 22 379 83 48. Fax. +41 22 379 83 53. Courriel : jean-christophe.loubier@geo.unige.ch